

S I M U L A T I O N D U B I L A N H Y D R I Q U E

D E S C U L T U R E S P L U V I A L E S

P R E S E N T A T I O N E T U T I L I S A T I O N
D U L O G I C I E L B I P

F. Forest

Division Recherche-Développement

Economie - Valorisation de l'eau

Février 1984

S O M M A I R E

Pages

PARTIE I - DESCRIPTION DU MODELE BIP

	LE CONTEXTE CLIMATIQUE	1
1.	<u>PLUVIOMETRIE JOURNALIERE</u>	3
1.1.	Le seuil pluviométrique de semis et levée des cultures (PSEM)	3
2.	<u>RUISSELLEMENT A LA PARCELLE</u> (RUSS)	6
3.	<u>RESSUYAGE DU SOL</u> (RESS)	11
4.	<u>DRAINAGE SOUS CULTURE</u> (DR)	12
5.	<u>EVAPOTRANSPIRATION REELLE SIMULEE</u> (ETR)	14
5.1.	Evaporation sol nu avant semi-levée (ESN1)	15
5.2.	Evaporation du couvert végétal (ETR)	16
5.3.	Estimation de ETR de reprise après une période sèche	22
5.4.	Evaporation du sol après récolte (ESN2)	22
6.	<u>RESULTATS DU BILAN HYDRIQUE BIP</u> (RES) La réserve en eau du sol	24
7.	<u>CRITERES APPRECIATION DU BILAN HYDRIQUE</u>	24
	(SATIS - DEFI)	
7.1.	Découpage du cycle en périodes caractéristiques....	25
8.	<u>LA RESERVE EN EAU UTILISABLE PAR PLANTE</u>	26

./.

PARTIE II - MODE UTILISATION DU MODELE BIP

1.	<u>PREPARATION DES FICHIERS</u>	29
1.1.	Fichier pluviométrique "PLUIES"	29
1.2.	Fichier ETP PLANTE + BESOINS EN EAU "ETP ETM"	30
2.	<u>INTRODUCTION DES PARAMETRES AGROCLIMATOLOGIQUES</u>	35
2.1.	Présentation des traitements - Choix des paramètres	35
2.2.	L'organisation des traitements pour une plante donnée	36
	- Date de semis	36
	- Seuil pluviométrique optimal	36
	- Sensibilité réserve utile	36
	- Effet du ruissellement	40
	- Influence d'un retard technique	40
	- Estimation de la dose d'irrigation	40
2.3.	Comparaison de situations agronomiques	42
	- 3, 4 durées de cycle	42
	- Retard au semis	42
	- Culture derobee	43
	- Culture de saison des pluies + saison sèche	43
3.	<u>EVALUATION DES RESERVES UTILES PAR SIMULATIONS SUCCESSIVES</u>	44
4.	<u>RESULTATS DE LA MODELISATION</u>	47
4.1.	Le fichier "SORTIE"	47
4.2.	Le fichier "SATIS ETR"	50

PARTIE III - EXEMPLES - APPLICATIONS AGRONOMIQUES

Choix variétal de la culture arachidière pour trois zones du Sénégal	52
Calage du soja au Moyen Ouest Malgache (station de Kanjasoa)	53
Identification du risque climatique sur culture d'arachide au Sénégal	53
Influence du travail du sol sur l'économie de l'eau sur culture d'arachide au Sénégal	54
Rendement du maïs en fonction de l'alimentation hydrique et du rayonnement global en Côte d'Ivoire	54

ANNEXES

I - BASE DE DONNEES - BESOINS EN EAU

Mil - Sorgho	55
Arachide - Nigelle - Soja	56
Maïs - Riz pluvial	57
Cotonnier	58

II - BASE DE DONNEES - RESERVE UTILE

Toposéquence Sahélienne	59
Toposéquence Soudanienne et Subhumide	60
Toposéquence Soudano-sahélienne	61

III - DOCUMENTATION	62
---------------------------	----

—

P A R T I E I

DESCRIPTION DU MODELE B I P

BILAN HYDRIQUE DES CULTURES PLUVIALES

LE CONTEXTE CLIMATIQUE

Les conditions pluviométriques en régions tropicales sont à plusieurs échelles déterminantes. La température, l'état hygrométrique de l'air, le statut hydrique du sol varient au gré des séquences sèches ou pluvieuses. Les cultures réagissent différemment en fonction des conditions spécifiques de l'environnement, de leurs aptitudes physiologiques...

Caractériser dans le temps et l'espace ces variations du climat passe donc, dans ces régions, par une analyse précise du régime pluviométrique, étape préalable avant l'analyse et l'explication du rendement.

En agriculture pluviale stricte, il est courant de se baser sur des mesures ponctuelles de la pluviométrie pour situer le caractère plus ou moins favorable, déficitaire ou excédentaire de la période de culture. Si l'on veut prendre en compte la réalité agricole, il convient cependant de pousser plus avant le diagnostic : intégrer l'état du sol, cultivé, nu ou en jachère, réaliser des expérimentations "in situ" visant à connaître les mécanismes de redistribution de l'eau. On citera notamment les travaux de l'IRAT et de l'ISRA (1) au Sénégal (sols sableux...), travaux de

l'IDESSA (2) en Côte d'Ivoire sur sols ferrugineux gravillonnaires, actions de recherche de l'IRAT en République Malgache sur sols bruns-rouges, etc.

Ces opérations ont non seulement contribué à caractériser le comportement hydrique des sols (recherches menées avec l'appui scientifique (3) de IMG Grenoble), mais aussi permis de chiffrer en termes pratiques le concept de réserve utile (RU) pour les plantes. Enfin, dans la plupart des cas, elles ont abouti à la détermination des consommations maximales en eau (ETM) des principales cultures tropicales.

On citera, en particulier, les mesures des coefficients culturaux (*) K_c et K'_c , respectivement indicateurs du rapport de consommation en eau de la plante, cultivée sous restriction hydrique, rapporté soit à l'évapotranspiration potentielle climatique selon PENMANN (K_c), soit à l'évaporation d'un bac normalisé OMM type classe A.

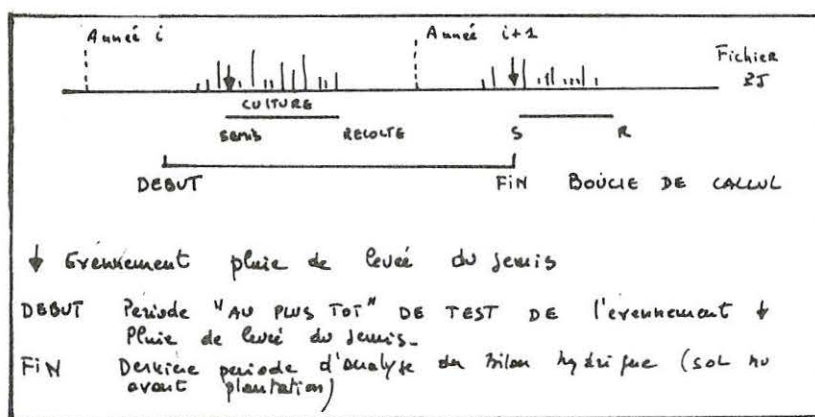
Disposant de ces référentiels "in situ", il était réaliste de concevoir un modèle simple de simulation du bilan hydrique, calé sur les mesures disponibles et intégrant, pour son utilisation agronomique, un ensemble de paramètres explicatifs des situations agricoles rencontrées.

$$(*) \quad K_c = \frac{ETM}{ETP} \quad ; \quad K'_c = \frac{ETM}{EVA}$$

1. LA PLUVIOMETRIE JOURNALIERE (PJ)

Le modèle BIP exige pour fonctionner un fichier séquentiel de pluviométrie journalière (modèle service hydrologique de l'ORSTOM). On notera que pour traiter un cycle cultural, il faut impérativement associer le fichier de l'année correspondante et celui de l'année suivante (tableau I). Ce fichier sera fictif si l'on veut traiter la dernière année de relevés disponibles.

Tableau I



1.1. Le seuil pluviométrique de semis suivi de la levée à l'échelle du champ (PSEM)

En conditions pluviales, l'agriculteur détermine sa décision de semer en fonction de nombreux critères. En l'absence de contrainte technique, deux objectifs semblent orienter son attitude.

1.1.1. L'option sécurité

Le risque d'échec de la plante sera d'autant plus élevé que la pluie sera faible et précoce. La tentation de réaliser des semis tardifs est ainsi bien réaliste : économie de semence (pas de risque de resemis), réduction de la compétition de l'herbe si le semis est réalisé avec matériel de culture modernisé, économie d'un sarclage, etc.

1.1.2. L'option productivité

Les études bioclimatologiques ont largement démontré l'intérêt du semis précoce sur le niveau du rendement potentiel. Ainsi, avec l'appoint de l'irrigation, on cherchera les dates de plantation les plus précoces possibles, soit 10 à 15 jours avant la date "moyenne" couramment adoptée par les paysans pratiquant le "pluvial strict" (si le décalage est supérieur, on devra utiliser des variétés de durées de cycle rallongées d'autant, pour éviter des dégradations importantes attendues du développement des oiseaux, insectes, etc qui se réalisera au détriment des couverts végétaux les plus avancés.

Ainsi, tout retard du semis par rapport au régime énergétique (rayonnement) correspond à une perte de potentiel de production, en raison d'une chute de l'énergie (photosynthèse) disponible. Cette perte est facilement indentifiable si l'on considère les courbes décadaires (10 jours) du régime d'évapotranspiration potentielle (ETP). Le calage "énergétique" idéal est celui qui donnera une valeur ETM élevée associée à une alimentation hydrique satisfaisante.

Pour tenir compte de ces deux options, le modèle, à l'image du paysan, intègre une fonction d'optimisation simple, formalisant une règle de décision représentative de la réalité. Un seuil pluviométrique de "semis et levée de la plante" (PSEM)

est ainsi introduit par l'utilisateur. La valeur de ce seuil décroît depuis un seuil plafond correspondant à la date au plus tôt DEBUT (rappel tableau I) pour lequel il est possible d'envisager un semis "réussi" et une valeur plancher correspondant au semis tardif, à la limite, réalisé en sec lorsque les pluies n'arrivent pas (Fig. II).

La valeur du seuil "au plus tôt" à introduire sera d'autant plus élevée que la date correspondante DEBUT (de simulation) sera située avant les périodes "normales" d'arrivée des pluies. On citera quelques valeurs (Tableau III) identifiées à la suite d'enquêtes en milieu paysan.

Tableau III : Seuils décisionnels de semis en fonction de la pluviosité

:	:	:	:	:	:
:	Pays	Lieu	Culture	Date début	PSEM
:	:	:	:	:	:
:	Sénégal	Bambey	Arachide	1er juin	70 mn
:	:	:	Mil	1er juin	0 mn (en sec)
:	:	Louga	Arachide	1er juil.	30 mn
:	Côte d'Ivoire	Bouaké	Riz pluvial	25 mai	20 mn
:	Haute Volta	Saria	Sorgho	10 juin	40 mn
:	etc	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:

En terme de sécurité, on comprendra que la valeur de PSEM dépend, dans une région donnée, de la valeur de la probabilité d'avoir dans les jours qui suivent la réserve en eau du sol alimentée par les pluies. Le seuil PSEM sera d'autant plus élevé que le régime des pluies "à venir" sera aléatoire. Des études statistiques systématiques de la distribution de

l'événement PSEM seraient d'ailleurs à réaliser, en étroite association avec des enquêtes "systèmes" à mener sur le terrain (voir au chapitre II.2.1.2. pour certains cas de figure se rapportant à la valeur de PSEM).

2. LE RUISSELLEMENT A LA PARCELLE (RUSS)

Le modèle BIP intègre une fonction simple de ruissellement malgré le peu d'informations connues sur ce phénomène pourtant fréquent sur les sols tropicaux cultivés. Toutefois, on dispose de référentiels (4) sérieux (CTFT, ORSTOM, IRAT, IITA, CIEH...) réalisés ponctuellement en parcelle d'observation (cases de Wishmeyer...).

Cependant, les travaux de l'IRAT sur les techniques culturales, associées aux diverses observations qui y ont été réalisées, ont permis d'avancer quelques hypothèses de travail utilisables pratiquement.

Le modèle analyse le ruissellement en fonction de deux critères : texture et technique culturale. L'utilisation doit identifier deux valeurs paramètres caractérisant :

1. Le seuil de pluie au-delà duquel le phénomène de ruissellement se déclenche (PRUS)
2. Le coefficient d'écoulement, ou fraction de la pluie ruisselant au-delà de la parcelle (KRUS).

En règle générale, la texture sableuse est favorable à une infiltration rapide de l'eau. Pour cette raison, le modèle élimine cette catégorie de sol (Tableau IV).

Pour les autres types de sols, dont la pente est supérieure à 3 %, on considère le modèle de ruissellement établi sur sol ferrugineux (simulateur de pluie ORSTOM en Haute Volta).

Les effets des techniques culturales jouent à la fois sur la valeur du seuil de déclenchement PRUS (le labour crée des mottes plus résistantes que le sol émietté, et il faut une lame d'eau plus importante pour que les sillons lâchent sous l'effet destructeur de la pluie) et sur la valeur du coefficient de ruissellement KRUS (une partie du ruissellement ponctuel peut être récupérée sur un autre emplacement dans la parcelle, alors qu'en sol non travaillé on assiste à un processus d'écoulement en nappe).

Tableau IV : Critères de simulation du ruissellement à la parcelle

:	:	:	:
Texture sol :	sablo/argileux	argileux	:
:	:	:	:
Non travail ou tra-	:	:	:
vail très superficiel:	:	:	:
PRUS	20 mm	10 mm	:
KRUS	30 %	40 %	:
:	:	:	:
Sol labouré	:	:	:
PRUS	30 mm	20 mm	:
KRUS	10 %	20 %	:
:	:	:	:

Pour des sols à pentes élevées, le modèle BIP est d'un intérêt très mineur, et le diagnostic hydrique passe par une toute autre approche, beaucoup plus orientée sur des méthodes d'hydrologie.

Lorsque l'utilisateur dispose d'un référentiel plus précis, il peut redéfinir lui-même la grille de sélection des valeurs PRUS et KRUS en fonction des modalités texture et travail du sol.

Pour tenir compte du phénomène réel, le déclenchement du ruissellement est pondéré pour les valeurs de pluie légèrement supérieures au seuil PRUS, comme l'explicite la fonction du modèle BIP présentée à la Figure 5.

La décomposition du processus de ruissellement pour une hypothèse de sol argileux, avec travail très superficiel (tabl.VI) permet d'identifier les différentes phases du mécanisme :

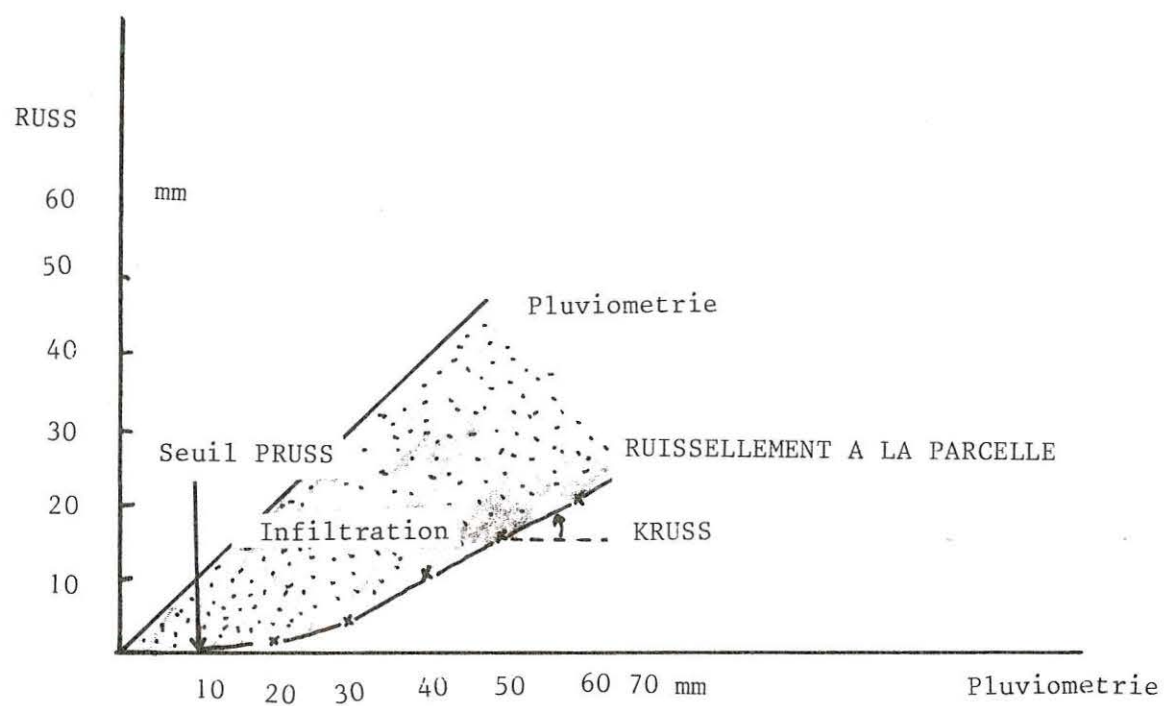
Tableau VI : Sol argileux KRUS : 40 % (*)
Travail superficiel PRUS : 10 mm

PJ	Valeur RUSS brute	Valeur RUSS pondérée	Explication
5	0	0	Résistance de la macrostructure du sol
10	0	0	
20	4	1	Début de la destruction des mottes
30	8	4	
40	12	12	L'eau s'écoule hors du champ Ecoulement laminaire de type hydrologique
50	16	16	
60	20	20	
70	24	28	

(*) A partir de la phase de l'initiation florale, la valeur du coefficient de ruissellement est systématiquement divisée par 2 (protection élevée du sol).

Dans les régions à risque pluviométrique élevé et comportant des sols peu perméables, il est utile de prendre en compte une fonction de ruissellement, même approximative, si l'on veut analyser précisément le bilan hydrique, en particulier

FIGURE 5 FONCTION DE RUISSELLEMENT DU MODELE BIP



dans le premier mois du cycle de culture. On verra en effet au chapitre "Calcul de l'ETR" que le ruissellement réduit sensiblement l'humectation du sol et, par conséquent, la réserve en eau au cours des premières semaines de culture où l'enracinement est encore superficiel. Après calcul du drainage, on dispose d'une estimation de la pluie efficace (PE).

3. LE RESSUYAGE DU SOL (RESS)

Lorsque les conditions hydriques sont satisfaisantes pour la culture, elles le sont aussi pour toutes les plantes et animaux susceptibles de rentrer en compétition (herbes, parasites, etc). Dans ces situations, il est impératif d'intervenir pour assurer la protection de la culture. Cette intervention peut être faite à pied ou avec des machines plus ou moins puissantes. La question qui se pose aux responsables agronomiques est de savoir s'ils peuvent rentrer efficacement dans le champ pour assurer l'opération ; si non, combien de jours ils devront attendre.

Ce problème, très important en agriculture intensifiée (blocs de l'autorité de la vallée du Bandama AVB en Côte d'Ivoire), est dû au phénomène physique de ressuyage du sol, dont la durée varie en fonction de la texture du sol et de l'intensité des pluies.

En l'absence d'un référentiel technique complet, le modèle estime, en nombre de demi-journées, la durée pendant laquelle le sol est impraticable (tableau VII) pour le travail mécanisé léger (culture attelée bovine).

Tableau VII : Estimation du nombre de jours impraticables pour le travail attelé en raison du ressuyage

Classe de pluie	Nombre de jours impraticables pour le travail attelé (RESS)
$0 < PJ \leq 10$	0
$10 < PJ \leq 20$	0,5
$20 < PJ \leq 40$	1 (en général, ce sont des pluies nocturnes ; le ressuyage s'étend du lendemain au jour suivant)
$40 < PJ \leq 60$	1,5 "
$60 < PJ$	2,0 "

Cet algorithme de calcul est valable pour les sols à texture argilo-sableuse. Pour les sols plus compacts (vertisol), il conviendra d'affiner la règle d'estimation.

4. LE DRAINAGE SOUS CULTURE (DR)

Les travaux menés en Afrique et en République Malgache sur les parcelles (de type Wishmeyer) de mesure "in situ" du bilan hydrique dans tous ses termes ont montré que l'écoulement en profondeur après une averse se réalisait dans les 12 heures après la pluie, pour une structure de sol de type gravillonnaire ou sableux. En sol plus argileux, le mécanisme de drainage est beaucoup plus lent et son importance est secondaire par rapport au processus de ruissellement.

Le modèle BIP quantifie la lame de drainage potentielle DR. Celle-ci peut être redistribuée de différentes manières dans la toposéquence selon la position relative de la parcelle cultivée. On citera les études morpho-pédologiques

de l'IRAT qui ont permis d'identifier les axes de drainage et les interfluves caractéristiques du paysage des blocs de culture (5) de l'A.V.V. (4) en Haute-Volta...

Le mode de calcul est simple (FRANQUIN et FOREST, 1974) et il a contribué à avoir une approche (6) précise de la quantité d'eau échappant aux racines.

La pluviométrie efficace (*) (5J) ou (10J) considérée comme l'offre en eau, est comparée à la valeur maximale de la réserve utilisable du sol (RU).

Si l'on considère le cas du modèle de calcul par 5 jours des termes du bilan hydrique, la différence (PE - RU), si elle positive, est immédiatement imputée au registre drainage. Dans ce cas, le solde, qui est égal à la valeur de la réserve utile RU, constitue l'offre en eau à la plante. Inversement, si la différence est négative, le registre drainage est maintenu à 0.

On notera que le fait de calculer le drainage avant de calculer l'évapotranspiration réelle ETR de la culture correspond mieux à la réalité : la cinétique de drainage étant nettement supérieure à celle de l'extraction racinaire, il s'agit bien d'évaluer une quantité d'eau qui échappe au système racinaire et ne sera pas disponible ultérieurement lors de l'arrivée de la période sans pluie.

Dans un autre domaine, celui de l'efficacité de fertilisation, on notera l'importance de l'évaluation du drainage en début de cycle sur l'estimation des pertes par lessivage des éléments fertilisants, en particulier de l'azote.

(*) après calcul du ruissellement, soit PE(5J) ou PE(10J)

A l'échelle du paysage, la valeur simulée du drainage (DR) peut être considérée comme indicatrice de l'importance de l'écoulement de l'eau (sols imperméables en profondeur) et du remplissage du bas-fond par processus de drainage oblique (remplissage des rizières de bas-fond au Nord Togo, etc).

Des corrélations significatives entre le drainage et le niveau de la nappe superficielle peuvent être obtenues. Ainsi au CNRA de Bambey (Fig. 8), une estimation de la hauteur de la nappe du Lutetien est obtenue à partir de la valeur cumulée du drainage sous la culture d'arachide (10).

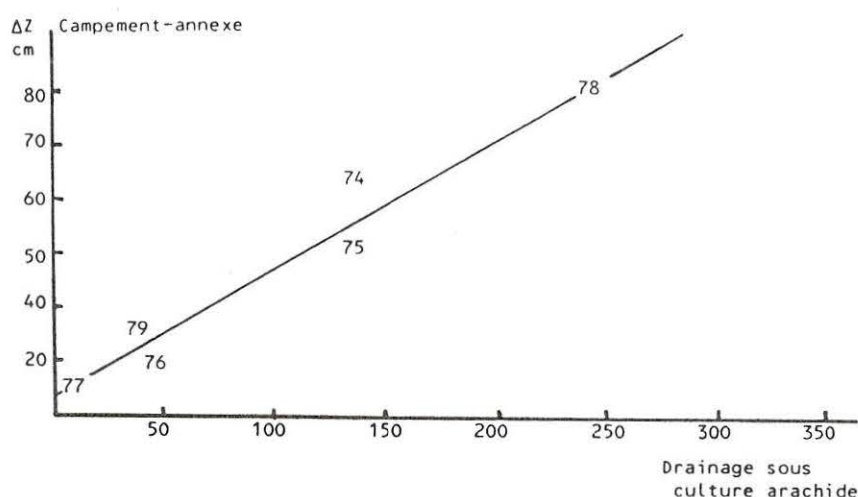


FIGURE 8

VARIATION NIVEAU DE LA NAPPE - BAMBEY

5. L'EVAPOTRANSPIRATION RELLE SIMULEE (ETR)

Au cours de son cycle de croissance et de développement, la plante passe par une série de phases d'assèchement et d'humidification du sol entrecoupées d'événements pluviométriques (averse, ruissellement, drainage) dont les durées cumulées pendant la période de végétation sont infiniment petites au regard du temps (semis- récolte) pendant lequel la plante extrait l'eau du sol pour assurer ses besoins.

Le modèle BIP s'intéresse donc au mécanisme de l'évapotranspiration réelle ETR et propose un mode d'estimation propre pour chaque phase du calendrier annuel cultural.

5.1. L'évaporation du sol nu avant le semis ESN1

Par construction, le modèle BIP analyse les termes du bilan hydrique à partir de la date fixée DEBUT proposée par l'utilisateur (rappel Tableau I). Pendant la période qui s'étend entre la date DEBUT et la période où le seuil pluviométrique de semis PSEM est atteint, le modèle adopte une règle de calcul de l'ETR caractéristique du comportement d'un sol nu.

A partir des résultats de bilan hydrique "in situ" obtenus à Bambey (Sénégal) et Bouaké (Côte d'Ivoire), une méthode simple d'estimation de ESN1 est proposée par le modèle BIP.

Si on admet l'hypothèse que le sol est soumis au processus d'évaporation sous l'effet de deux mécanismes :

- . d'une part l'effet "mèche" où, par des cheminements multiples à travers la porosité du sol, l'humidité résiduelle en profondeur échappe vers l'atmosphère,
- . d'autre part l'effet "de surface", par lequel l'eau infiltrée en surface est directement soumise au processus d'évaporation de type BAC d'eau libre,

la formule de calcul est alors décomposée en deux parties :

$\text{ESN1} = \text{EVA (1J)} + \text{RESS} \times \text{EVA (1J)}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> (période) effet mèche effet de surface </div>
--

avec : EVA (1J) : évaporation du bac classe A
ETP journalière corrigée, soit 0,2 EVA(5J)
sur la période d'analyse (5J)

RESS : nombre de journées, au cours de la période
où la surface du sol est mouillée.

En terme d'explication de la réalité, cette fonction démontre que 5 pluies de 15 mm rechargent moins bien le sol ($ESN(5J) = 21 \text{ mm}$) qu'une seule pluie de 50 mm ($ESN(5J) = 15 \text{ mm}$) pour une demande évaporative journalière de 6 mm (soit avec $EVA(5J) = 30 \text{ mm}$ une mise en réserve de 9 mm à comparer à 15 mm).

Cette méthode de calcul correspond au fonctionnement hydrique de sols sur lesquels aucune protection contre l'évaporation n'est appliquée (pas d'effet Mulch). Il serait possible d'introduire, par exemple, la modalité "paillage du sol" qui aurait pour effet de modifier les valeurs de la série numérique des $ESN(1J)$ pour les jours suivant la pluie, en réduisant notamment très sensiblement les valeurs de la cinétique d'évaporation (discontinuité hydrique dans les 10 premiers centimètres du sol et arrêt de l'effet mèche).

Ce type d'amélioration serait à considérer à partir de résultats (7) mesurés sur le terrain (essais IRAT - IDESSA - AIEA menés à Bouaké).

5.2. L'évaporation du couvert végétal du semis à la récolte ETR

Lorsque l'événement PSEM (pluie de semis) - démarrage de la plante (levée) est identifié, le modèle BIP prend en compte une procédure de calcul de l'évapotranspiration réelle de la culture (ETR).

On rappellera les bases du calcul, qui sont fondées d'une part sur la démarche d'analyse développée par PENMANN, d'autre part sur l'utilisation d'un algorithme simple (8) mis au point par EAGLEMANN, adopté tel quel par FRANQUIN et FOREST (6) pour être utilisé dans les modèles d'analyse fréquentielle du bilan hydrique, et enfin généralisé par FOREST (9) à l'ensemble des cultures, cultivées en conditions pluviales et irriguées.

5.2.1. Définition et domaine de variation de ETR

Les besoins en eau des cultures sont exprimés par la formule générale :

$$ETM(i) = K(\text{stade}) \times ETP(i)$$

avec $ETP(i)$: demande évaporative au cours de la période (i)
 $K(\text{stade})$: coefficient cultural, ou indice de consommation de la culture au cours du stade phénologique atteint au cours de la période(i).

Le modèle BIP utilise comme référentiel ETP une base de donnée mise au point par l'IRAT et utilisant les valeurs de l'évaporation du bac classe A. En référence aux recommandations de l'OMM et de la FAO, on intitulera les coefficients par la notation K' :

$$ETM(i) = K'(\text{stade}) \times EVA(i)$$

Lorsque les valeurs de l'évaporation du bac classe A ne sont pas disponibles, le modèle BIP utilise les valeurs corrigées de l'ETP PENMANN :

$$ETM(i) = K'(\text{stade}) \times ETP \text{ corrigée}$$

Cette méthode permet de conserver la même base K' pour les coefficients culturaux quel que soit le référentiel évaporation (FAO ou IRAT). En règle générale, en zone soudano-sahélienne, l'ETP corrigé est égale à la valeur de l'ETP multiplié par 1,2 en saison des pluies, et 1,5 en saison sèche (en zone équatoriale, l'ETP est supérieure à l'évaporation du bac classe A). En période de plein développement, il est fréquent que les coefficients culturaux dépassent la valeur 1 ; par suite, l'intervalle de variation est défini par :

$$0 \leq ETR \leq ETM$$

ou, si l'on considère le référentiel climatique régional :

$$0 \leq ETR \leq K'(\text{stade}) \times EVA$$

En termes agronomiques, on définira la période critique par l'intervalle :

$$0 \leqslant \text{ETR} \leqslant \text{MAX} (K'(\text{stade})) \times \text{MAX EVA}$$

où il y a coïncidence entre les exigences en eau maximales de la plante (K' élevé) et la demande évaporative maximale.

La fonction de l'agronome est de trouver les solutions techniques pour éviter cette situation critique.

En termes physiologiques, on rappellera la période de sensibilité de la plante par :

$$0 \leqslant \text{ETR} \leqslant \text{MAX} (K'(\text{stade})) \times \text{EVA}$$

Le rôle de l'agronome consiste à trouver les solutions permettant de minimiser EVA (calage du cycle).

En considérant les bornes supérieures de l'intervalle, il est facile d'admettre que l'ETR puisse atteindre, à la limite, des valeurs supérieures à l'ETP et EVA, étant donné les valeurs maximales des coefficients K' (cf annexe I).

5.2.2. Le Mode de calcul de ETR par le modèle BIP

En saison des pluies, la plante n'est que rarement en situation de consommation non limitée (ETM). Pour quantifier la fonction de variation de ETR en régime variable d'alimentation hydrique, il fallait donc utiliser un mode de calcul compatible avec la technique de simulation du bilan hydrique (Fig. 9). C'est à partir d'un algorithme expérimental, mis (8) au point par EAGLEMAN, que le modèle BIP estime d'une manière empirique l'ETR culture.

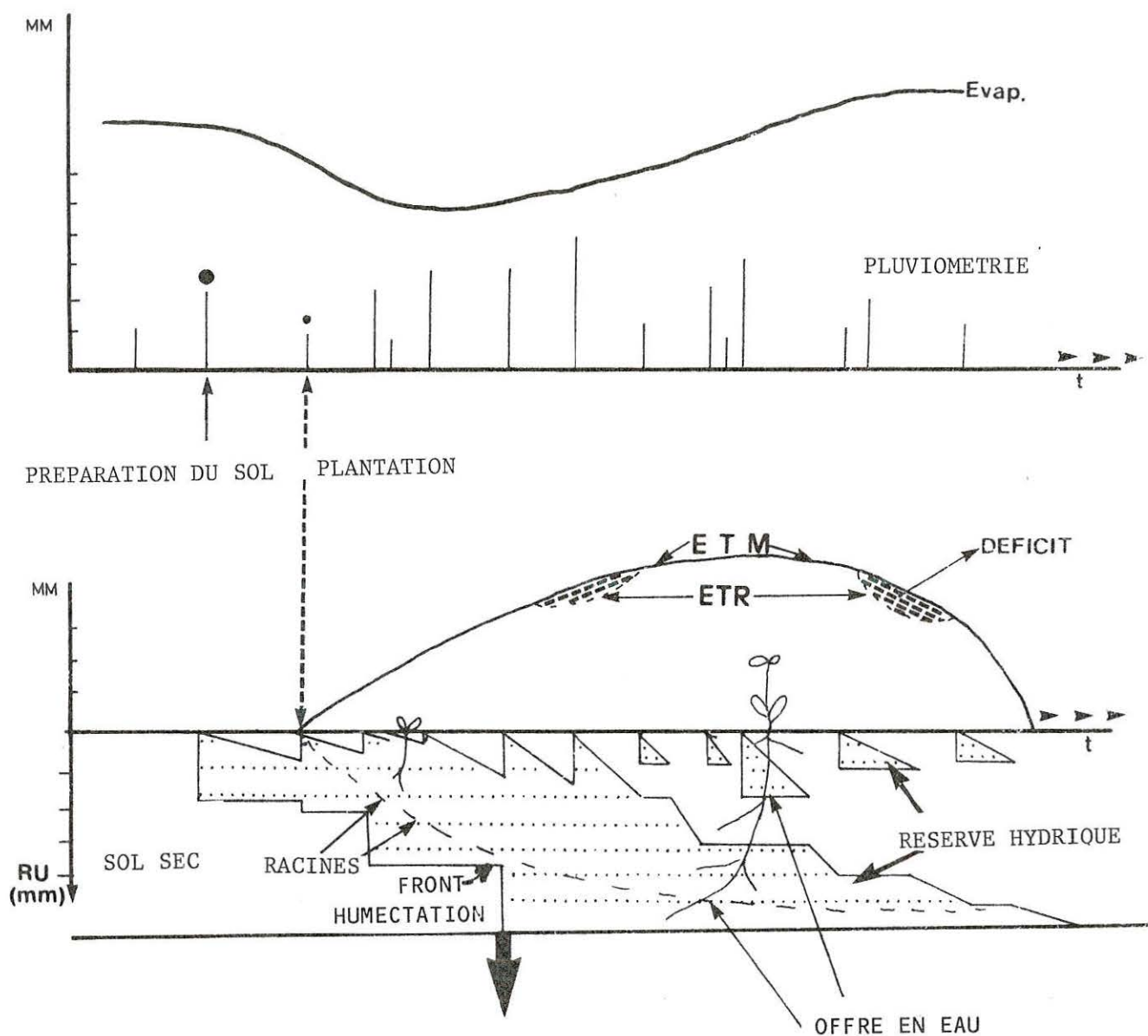
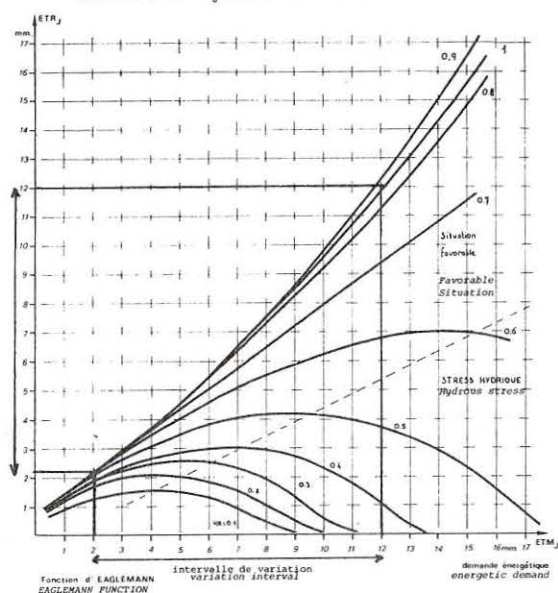


FIGURE 10

Relation entre l'évapotranspiration réelle journalière ETR_J et la demande ETM_J en fonction de l'humidité disponible
 RATIO OF DAILY ETR_J ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION AND CLIMATIC EVAPOTRANSPIRATION ETM_J NEEDS IN FUNCTION OF AVAILABLE MOISTURE



5.2.3. Le calcul de ETR gazon

Eagleman s'est intéressé à l'ETR d'un gazon cultivé dans les conditions expérimentales précisées par Penmann.

En régime limitant l'alimentation hydrique, l'ETR d'un gazon est une fonction curvilinéaire de deux facteurs (FIGIO) :

- la demande évaporative climatique (EVA)
- le taux d'humidité extractible par l'enracinement (HR).

La formule de calcul était établie comme suit :

$$\begin{aligned} \text{ETR}_J = 0.7 - 0.05 J + \text{HR} (4.9 \text{ ETP}_J - 0.6 \text{ ETP}_J^2) \\ - \text{HR}^2 (8.6 \text{ ETP}_J - 1.6 \text{ ETP}_J^2) \\ + \text{HR}^3 (4.3 \text{ ETP}_J - 0.9 \text{ ETP}_J^2) \end{aligned}$$

Sur le dispositif expérimental, le terme HR était évalué par mesures neutroniques ; dispositif non disponible en milieu réel et impliquant ; par suite, pour la modélisation, la mise au point d'une formule généralisée, applicable à toutes les cultures tropicales s'avérait nécessaire.

5.2.4. Méthode généralisée de calcul de ETR culture

On peut admettre que l'expérimentation d'Eagleman portait sur le gazon de référence décrit par Penmann. Cela revient à admettre la relation :

$$\begin{aligned} \text{ETM (gazon)} &= K(\text{stade}) \times \text{ETP} \\ \text{ou } \text{ETM (gazon)} &= K'(\text{stade}) \times \text{EVA} \quad \text{avec, par définition :} \\ K'(\text{stade}) \text{ ou } K(\text{stade}) &\text{ égal à 1.} \end{aligned}$$

Il est donc admissible de remplacer, dans la formule d'Eagleman, le terme ETP_c par $\text{ETM}_c(\text{gazon})$ avec la série des coefficients $K(\text{stade})$ égaux à 1.

Concernant le second facteur HR, il fallait trouver une méthode simple d'estimation, à partir de la seule connaissance du régime pluviométrique d'une part, et de la réserve en eau utilisable d'autre part.

Principe de calcul de HR

Le modèle BIP est en fait un modèle d'humectation du profil HUM calculée selon une loi de descente de type piston.

HUM(i) = VALEUR MAX (PLUIE + RESERVE) = HUM(k)
 au cours de la période (i) observée depuis le début du cycle avec $k \leq i$

Le taux d'humidité extractible est alors calculé par le rapport :

$$HR(i) = \frac{\text{offre en eau période (i)}}{HUM(i)} = \frac{N}{D}$$

avec l'intervalle de variation suivant : $0 \leq HR \leq 1$

Lorsque l'humectation du profil atteint la valeur maximale utilisable par les racines, soit la valeur RU, le rapport s'écrit :

$$HR(j) = \frac{\text{offre en eau (j)}}{RU} = \frac{P_j + RSJ-1}{RU}$$

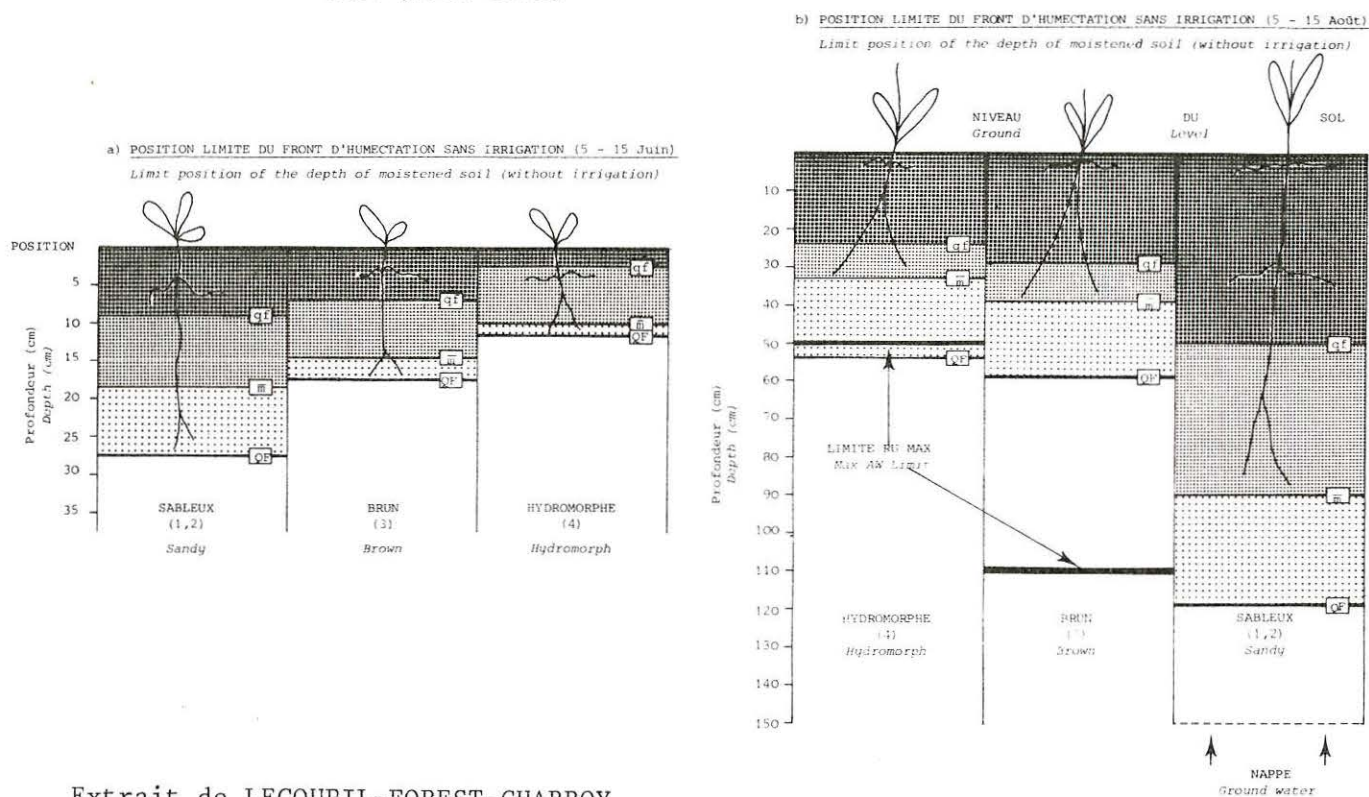
Par suite, jusqu'à la récolte, le dénominateur reste à la valeur RU.

Signification agronomique

Le modèle considère que les racines descendent en profondeur et suivent la limite du front d'humectation. Par suite, le rapport de calcul de l'humidité extractible HR peut être explicité en termes agronomiques :

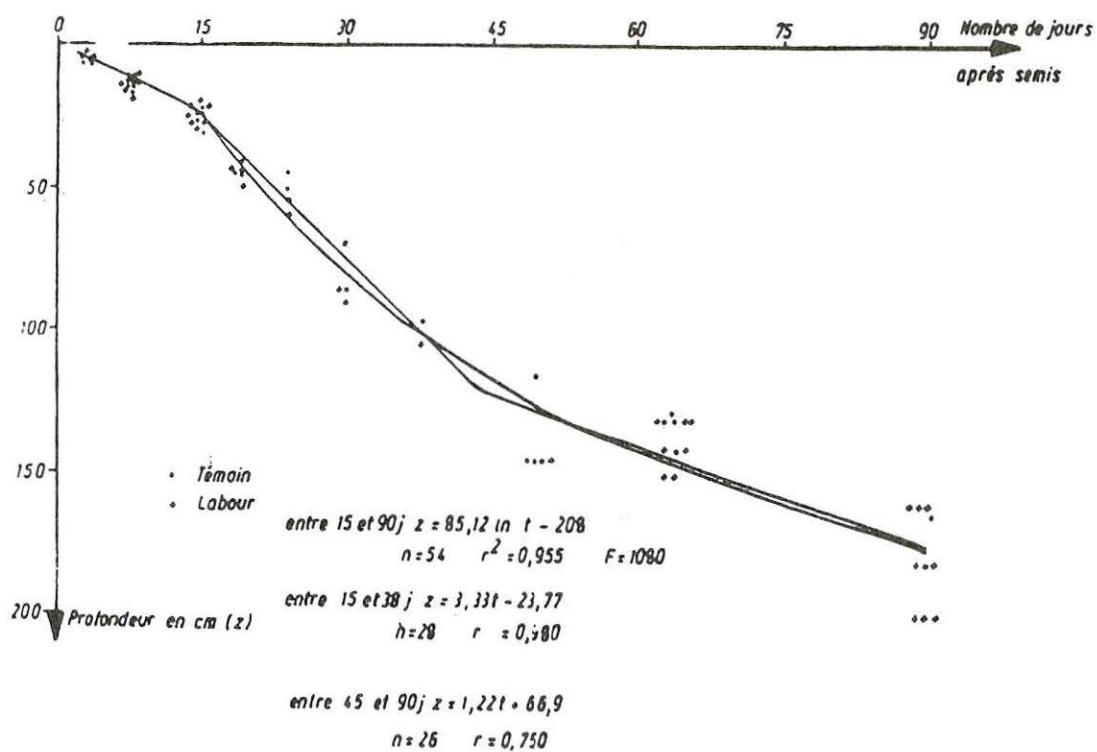
$$HR = \frac{\text{fraction du système racinaire humectée}}{\text{totalité de l'enracinement}}$$

FIGURE 11 Influence du regime pluviometrique
sur la profondeur d'humectation du
sol (1930-1979)



Extrait de LEGOUPIL-FOREST-CHARROY

- Evolution du front racinaire du mil Souma -



Extrait de CHOPART (these IRAT).

Cette procédure de calcul permet d'une part de prendre en compte une lente vidange de la réserve, d'autre part d'estimer d'éventuels reports de réserve d'une campagne à l'autre.

NOTA : on constatera que la cinétique d'évaporation "après cycle" est la moitié de celle proposée "avant semis". Cette différence est justifiée par le fait qu'après culture l'eau en réserve est en général stockée en profondeur, et donc échappe mieux à la reprise par capillarité.

6. ESTIMATION DES RESULTATS DU BILAN HYDRIQUE LA RESERVE EN EAU DU SOL UTILISABLE (RS)

Disposant de l'évaluation de l'ETR, du ruissellement et du drainage, le modèle évalue le stock d'eau résiduel en fin de période :

$$RS(i) = P(i) - RUSS(i) + DR(i) - ETR(i) + RS(i-1)$$

Compte tenu du mode de calcul du bilan hydrique, l'intervalle de variation du terme RS est borné à droite par la limite RU - ETM :

$$0 \leq RS \leq RU - ETM$$

Cette limite est due au fait que l'offre en eau maximale à la plante est limitée à la valeur RU (le drainage étant calculé avant l'ETR), et d'autre part au fait que la valeur maximale de RS est atteinte lorsque la plante est dans les conditions de l'ETM.

7. ESTIMATION DES CRITERES D'APPRECIATION DU BILAN HYDRIQUE

En agronomie, l'intérêt du bilan hydrique est de produire des indices de satisfaction des besoins en eau (ISBE) explicatifs de la production.

En référence aux travaux agro-climatologiques menés par la

Communauté Internationale, le modèle propose les critères suivants :

SATIS * $\frac{ETR(i)}{ETM(i)}$ Indice de satisfaction des besoins en eau au cours de la période (i)

DEFI * $ETM(i) - ETR(i)$ Déficit hydrique de la culture au cours de la période (i)

7.1. Intérêt du découpage du cycle pour l'amélioration du diagnostic hydrique

Les plantes passent, au cours de la période de végétation, par des stades de développement différents, correspondant à des comportements physiologiques caractéristiques (initiation paniculaire, floraison, épiaison, etc).

Pour répondre au souci d'amélioration des connaissances sur les relations entre production et alimentation hydrique , ou sur les aptitudes de telle plante à résister à la sécheresse, le modèle propose un découpage (Tableau 13) du cycle en 4 périodes.

Tableau 13 : Découpage du cycle pour le diagnostic hydrique

PHASE :	Levée- croissance	Initiation fleur (épi)	Pleine fleur	Maturation
TITRE :	IDV	F11	F12	MATU
DUREE : (jours)	D1	D2	D3	D4
Paramètre à intro- duire :	D1/PAS	D2/PAS	D3/PAS	D4/PAS

Pour chacune de ces phases, les indices de satisfaction des besoins en eau $\frac{ETR}{ETM}$ ou ISBE sont calculés. Le modèle BIP propose d'ailleurs un tableau de synthèse "SATISETR" reprenant uniquement les valeurs par phase, à la différence du fichier "SORTIE" qui donne l'ensemble des résultats chronologiques du bilan (cf tableau 21).

NOTA : si le PAS est de 5 jours, le découpage accepté est valable pour les valeurs multiples de 5 ; si le PAS est de 10 jours, le découpage accepté est valable pour les valeurs multiples de 10.

A des fins d'une meilleure compréhension de l'efficacité de la fertilisation, le paramètre Drainage au cours des phases EDV et F11 est aussi donné comme information dans "SATISETR". On rappellera que ce terme $DR(IDV, F11)$ est indicateur d'une part d'un excès d'eau, mais aussi, ce qui est le cas en milieu tropical, d'une forte chute possible du rayonnement.

Les expériences IN SITU, notamment en Côte d'Ivoire, ont montré que les rendements moyens étaient souvent obtenus malgré des valeurs ISBE très élevées (sup. à 0.90), les années où le terme DR était élevé pour les 40 à 50 premiers jours du cycle.

8. L'ESTIMATION DE LA RESERVE EN EAU UTILISABLE PAR LA PLANTE - RU (en mm)

Le modèle BIP prend en compte, sous la forme d'un seul paramètre (RU), le rôle du sol dans la contribution au stockage de l'eau et à l'alimentation hydrique de la plante.

Cette simplification, au premier abord simpliste, a montré son efficacité. Le point important étant en fait de définir la réserve utile représentative de l'ensemble de la parcelle cultivée, ce qui implique inévitablement d'avoir à sa dispo-

sition des données pédologiques ou, l'idéal, des résultats de bilans hydriques in situ.

L'expérience de l'IRAT en matière d'hydropédologie tropicale nous a permis d'identifier les grands domaines de variation de la réserve utile. A partir de la description de la texture, de l'évaluation de la profondeur enracinable, il est possible, à partir des tableaux hydropédologiques (annexe II), de choisir les valeurs de RU pour la simulation.

On notera le mode d'estimation du paramètre RU :

$$\text{RU : } \frac{\text{profondeur enracinable} \times \text{RUR}^*}{(\text{en cm})} \times \frac{1}{100}$$

* RU de référence donnée pour un sol théorique de 100 cm de profondeur utilisable.

Quelques exemples pratiques mettent en évidence le "poids" de la composante Profondeur enracinable dans l'estimation de la RU. Dans la réalité, les agriculteurs préfèrent aussi des terres sableuses profondes à fort enracinement aux terres plus lourdes et peu profondes. De plus, pour des raisons d'ordre morphogéologique, les sols les plus argileux pour lesquels la valeur de la RUR est élevée sont en général peu profonds, avec un horizon compact à 40-50 cm. La valeur de RU est donc souvent inférieure à celle observée sur une parcelle plus sableuse et plus profonde.

Ainsi, en année pluvieuse, il est fort possible que les agriculteurs, conscients empiriquement de ces différences, portent plus d'attention à leurs cultures de dunes, plutôt qu'à leurs activités de bas de pente, voir de bas-fond. L'évolution récente de la pluviométrie à la baisse devrait modifier ce comportement, avec un effort accru de l'investissement sur le bas-fond. A moins que les pluies ne reprennent.

Simuler à 3 niveaux de RU

En l'absence de données précises sur la pédologie et la RU, l'utilisateur aura intérêt à étudier une fourchette de 3 valeurs de la réserve utile, ce qui (tableau 13.1) permettra de bien encadrer la réalité et donner des résultats représentatifs de l'hétérogénéité de la parcelle.

Tableau 13.1

Bouaké - Sol ferrugineux gravillonnaire

RUR : 80 mm (100 cm)

Horizon compact variant entre 50 et 70 cm

Parcelle de plateau

Hypothèses de simulation pour le riz pluvial :

	RUR	ENRACINEMENT
RU1	35 mm	50 cm
RU2	45 mm	70 cm
RU3	80 mm	100 cm

PARTIE II

MODE D'UTILISATION DU MODELE BIP

1. INTRODUCTION - LA PREPARATION DES FICHIERS

Vous allez entrer dans l'univers simulé des relations eau - sol - plante. Celui-ci est informatisé, donc nouveau pour certains, et rigoureux pour les initiés. Aussi, avant toute tentative de manipulation du logiciel, il sera nécessaire de bien préparer le programme de travail et rassembler les éléments nécessaires.

1.1. Le fichier pluviométrique "PLUIES"

Les données de pluviométries journalières proviennent en général des services météorologiques, sous la forme de bordereaux mensuels. Un premier logiciel "SAISIE" vous permettra de monter vos fichiers "PLUIES" (Tab. 14) qui seront utilisés pour la modélisation et stockés dans la base de données.

Le format d'écriture est conforme au modèle ORSTOM mis au point pour l'établissement de la base de données pluviométriques du CIEH pour les Etats d'Afrique de l'Ouest.

Lors des exécutions, le fichier utilisé pour la simulation aura toujours le nom standard "PLUIES". L'utilisateur aura donc à transférer les données de son fichier "NOM STATION" dans le fichier "PLUIES" préalablement vidé :

- . soit en CP/M avec la fonction PIP
- . soit en CROMIX " " " COPY.

Exemple :

STATION A TRAITER : BAMAKO VILLE
 ANCIEN TRAITEMENT : FICHER "PLUIES"

- 1) ERASE PLUIES (CP/M)
 ou DELETE PLUIES (CROMIX)
- 2) PIP PLUIES = BAMAKO. V (CP/M)
 COPY BAMAKO PLUIES (CROMIX)

Cette procédure réalisée, le modèle est prêt à utiliser les données pluviométriques journalières de BAMAKO.

1.2. Le fichier Evapotranspiration potentielle maximale ETM des cultures "ETP ETM"

En première ligne, le fichier "ETP ETM" indique le nom du lieu, l'identification de la plante et le découpage du cycle en 4 périodes (tab. 15).

Cette première ligne est purement indicative, elle n'est pas prise en compte par le modèle BIP. Elle sert à identifier dans la base de données "ETP ETM".

Ligne 1 : NOM LIEU, PLANTE, DECOUPAGE
 Format 4A4 4(I2,1X)

La structure du fichier "PLUIES" est établie comme l'indique le tableau 16, page suivante :

Tableau 16 : Configuration du fichier "PLUIES"

	1ère ligne	NOM STATION (4A4)		
x	2ème ligne	CODE STATION, ANNEE (1X, I2, I4, 1X I4) avec code pays code station		
mois	3ème ligne	PLUIE 1ère quinzaine (14X,16 F4.1) jours 1 à 15		
1	4ème ligne	PLUIE 2ème quinzaine	idem	jours 16 à 29,30,31
	5ème ligne	PLUIE 1ère quinzaine	idem	jours 1 à 15
2	6ème ligne	PLUIE 2ème quinzaine	idem	jours 16 à 29,30,31 etc
12	25ème ligne			
	26ème ligne			
<hr/>				
	27ème ligne	CODE STATION, ANNEE (idem ligne 2)		
24 lignes correspondant aux 12 mois de l'année (format identique ligne 3)				
<hr/>				
		CODE STATION, ANNEE (idem ligne 2)		
24 lignes				
ligne blanche - fin de fichier				
<hr/>				
CTRL 2 (ou équivalent)				

En phase opérationnelle, il sera possible de ne pas répéter systématiquement les codes stations pour chaque ligne d'enregistrement (tableau 14).

L'utilisateur notera que les enregistrements pour la première quinzaine de chaque mois sont limités à 15 jours. La dernière position (n° 16) est toujours blanche ou nulle. Par contre, concernant la seconde quinzaine, le nombre d'enregistrements varie selon le mois :

Février	13
Janv., mars, mai...	16
Avril, juin...	15

Les données EVA ou ETP CDR sont présentées selon deux lignes correspondant chacune à 1 semestre :

Ligne 2	18	valeurs	décadaires	(10j)	de	EVA	(mm)	(18 I3)	sem.1
Ligne 3	18	"	"	"	"	"	"	(18 I3)	sem.2

Les données K'(stade) sont présentées en mode "pas 5 jours" ou "10 jours" selon le choix de l'utilisateur.

En mode "PAS 5 JOURS" (recommandé en zone tropicale et pour les cultures saisonnières) :

ligne 4	18	valeurs	K'(stade)	(18 F4.2)	1er	trim.	(90 jours)
"	5	18	"	"	"	2ème	"
"	6	18	"	"	"	3ème	"
"	7	18	"	"	"	4ème	"

En mode "PAS 10 JOURS", seules les lignes 4 et 5 sont à remplir, les 2 dernières étant systématiquement écrites mais remplies avec les valeurs 0.00 :

ligne 4	18 valeurs K'(stade)	(18 F4.2)	1er sem.	180 j
" 5	" "	"	2ème "	180 j
" 6	18 valeurs	(0.00)		
" 7	18 valeurs	(0.00)		

Remarque importante

1) Les données EVA sont exprimées en valeurs décadaires propres (10 j). Le modèle BIP interprète automatiquement ces valeurs pour restituer les valeurs caractéristiques des fins de chaque mois :

Décade (3) janvier 11 jours
 février 8 "
 mars 10 "
 etc.

2) L'utilisateur aura intérêt à contrôler le fichier ETP ETM avant toute simulation et à vérifier que les valeurs de K'(stade) sont bien présentées selon le mode Pas 5 jours ou 10 jours choisi.

En pratique, disposant de la base de données K'(stade) de 10 jours (cf annexe I), le passage en mode 5 jours se fait par interpolation entre les valeurs (LIDON, FOREST, Etude CIEH, IRAT)

2. L'INTRODUCTION DES PARAMETRES AGRO-CLIMATOLOGIQUES

Les fichiers "PLUIES" et "ETP ETM" étant préparés et vérifiés, l'utilisateur peut lancer le modèle BIP4.

2.1. La fiche de présentation des traitements

La fonction du modèle BIP est l'aide au diagnostic agronomique grâce à l'établissement d'un bilan hydrique de référence explicatif, à divers degrés, du rendement. Pour réaliser ce diagnostic et tenir compte de la variabilité des situations, l'utilisateur doit préparer un programme d'analyse systématique répondant à ses objectifs recherchés.

Le modèle BIP permet de combiner, pour une plante cultivée en un lieu donné, 3 types d'informations et d'en analyser (Tab. 17) les interactions en terme de bilan hydrique.

Tableau 17 : Caractérisation des situations susceptibles d'être simulées

LE PAS D'ANALYSE :		(5 ou 10 J)
I.	<u>LA SITUATION AGROCLIMATIQUE</u>	
	- le lieu	(PLUIES)
	- la culture	(ETP ETM)
	. durée du cycle	(jours)
	. découpage du cycle	(jours)
II.	<u>LE CALAGE DE LA CULTURE</u>	par rapport au régime des pluies
	. la date de semis envisagé au + tôt	DEBUT (mm)
	. le seuil pluviométrique de semis	PSEM "
	. le décalage du semis par rapport à l'événement pluie de semis	IDECAL (j)
III.	<u>LE COMPORTEMENT HYDRIQUE DU SOL</u>	
	. le seuil pluviométrique ruissel. ^t	PRUSS (mm)
	. le coefficient de ruissellement	KRUSS (%)
	. la réserve utile pour la plante	RU (mm)
IV.	<u>LE RECOURS A L'IRRIGATION</u>	
	. dose au semis	IDOSEM (mm)
	. dose au cours du cycle de culture	IDOSE (mm)

2.2. L'organisation des traitements "à plante constante"

Le modèle permet l'introduction des paramètres selon le mode conversationnel. Pour utiliser au mieux le temps machine, le modèle prévoit en outre une boucle de travail sur un nombre n de simulations. Cette possibilité sera à exploiter pour les analyses de sensibilité (tab. 18).

2.2.1. Recherche de la date optimale de semis pour un seuil pluviométrique donné :

- l'utilisateur définit une valeur de la pluie de semis PSEM
- la boucle de calcul se fait sur une série chronologique des valeurs de DEBUT
- les autres valeurs étant introduites et conservées au cours des simulations
- la valeur de DEBUT optimale sera celle qui donne les ISBE les plus élevées.

2.2.2. Recherche, pour une date DEBUT optimale, du seuil minimum de pluviométrie de semis, qui soit compatible avec la satisfaction des besoins en eau ISBE (début de cycle)

Dans ce cas, l'utilisateur introduit la valeur optimale DEBUT et réalise une boucle sur une série de valeurs PSEM. Ces deux simulations, systématiques, permettent de caractériser la situation (plante x sol x climat) étudiée et de définir les conditions d'une mise en culture optimale.

2.2.3. Influence de la réserve utile en eau (RU) sur les termes du bilan hydrique

Cette sensibilité réelle peut être testée en prenant en compte la série chronologique disponible et en réalisant une boucle de calcul sur plusieurs valeurs de RU (RU1, RU2...).

bip4

LE CONTENU DU FICHIER PLUIES EST IL CORRECT ?
SI OUI RETURN, SI NON CONSULTEZ PAR SCREEN PLUIES

LE PAS EST IL 5 OU 10 JOURS ? INDiquer:

22

05

NOM DU PAYS ET DE LA STATION :

[illegible]

senegal bamboos area

DECADE OU PENTADE DE SEMIS AU : TOT (1A36 OU 72):

22

36

DEBUT

SEUIL DE PLUVIOMÉTRIE POUR LE SEMIS PRÉCOCE ? (mm)

233

0.30

PSEM

LE BILAN HYDRIQUE EST CALCULÉ POUR UN CYCLE DE CULTURE DONNÉ À VOTRE CHOIX
COMBIEN DE SITUATIONS PÉDOKLIQUES VOULEZ-VOUS ÉTUDIER ?

TABLE 6:

33

03

3 SIMULATIONS DEMANDEES

LA CULTURE EST :

X X X X X X X X X X X X X X X X

arachide 105

VALLUR DE LA RESERVE UTILISABLE EN LAU :

XXX 33

020

RU

DUREL DU CYCLE :

***JOURS

105

SEUIL ET COEFFICIENT DE RUISSELEMENT:

XXXXXX

PRUSS KRUSS

Rappel du fichier ETPETM

ETP DECADAIRE 1ER SEMESTRE(10VALEURS) :

00 92 97 91 97 105 102 111 101 109 112 110 114 100 104 97 92 92

ETP DECADAIRE 2EME SEMESTRE(10VALEURS) :

03 77 71 67 61 50 57 53 56 65 66 71 76 63 60 77 60 76

LES COEFFICIENTS CULTURAUX SONT :

.23	.23	.41	.41	.65	.65	.93	.93	1.06	1.06	1.04	1.04	.93	.93	.95	.95	.92	.92
.70	.70	.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

DOSE D'IRRIGATION POSSIBLE AU SEMIS ? (>=0) :

IDOSE

VALLUR DE LA DOSE POSSIBLE EN COURS DE CULTURE :

IDOSEM

NOUVELLE ANNEE DEBUT,FIN :

19731979

LES BESOINS SONT DONNES SELON LE PAS 5 OU 10

RAPPEL DU PAS :

5JOURS

DUREE DES PHASES PHYSIOLOGIQUES :

IDV FL1 FL2 MAT

DUREE PHASE SEMIS CROISSANCE EN JOURS :

xx

30

DUREE 1ERE PARTIE DE LA FLORAIISON :

xx

25

DUREE 2EME PARTIE DE LA FLORAIISON :

xx

25

DUREE PHASE DE MATURATION :

xx

25

LE CYCLE EST IL LE PREMIER A SEMER,SI OUI TAPER 0

SINON TAPER DUREE DU DECALAGE EN JOURS :

IDECAL

**jours

DONNER LE NOMBRE DE PERIODES POUR LESQUELLES

LE DETAIL DU BILAN EST UTILE (MINI :6,MAXI :72

xx

72

SUITE POUR LANCEMENT DES SIMULATIONS 2 3 ...etc;;.

```

ANNEE :1973
ANNEE :1977
ANNEE :1977
ANNEE :1980
    }
VOUS ALLEZ VERS LA SITUATION NO: 2 DE :senegal bambeys a
LE PAS EST DE: 5JOURS
LA CULTURE EST :arachide 105
LA DUREE DU CYCLE EST DE :105JOURS
LE DEBUT EST A LA PERIODE NO :36
DONNER LE NOUVEAU DEBUT :
++
36
    }
    :

DONNER LA RU NOUVELLE :
***MM
070

NOUVELLE PLUIE AU SEMIS PRECOCE :
***MM
030

NOUVEAU COEFF RUISSELLEMENT
**%

DOSE D'IRRIGATION POSSIBLE AU SEMIS ? (>=0) :
***mm

VALLUR DE LA DOSE POSSIBLE EN COURS DE CULTURE :

***mm

NOUVELLE ANNEE DEBUT,FIN :

*****
19731977

LES BESOINS SONT DONNES SELON LE PAS 5 OU 10
RAPPEL DU PAS :
5JOURS
LE CYCLE EST IL LE PREMIER A SEMER,SI OUI TAPER 0
SINON TAPER DUREE DU DECALAGE EN JOURS :
**jours
20

```

TEST D'UN DECALAGE DE 20 JOURS

Dans ce cas, on introduira une valeur de DEBUT très précoce avec un seuil PSEM élevé, ce pour tenir compte de possibles années où le démarrage de la saison a été très précoce.

2.2.4. Influence du ruissellement RUSS sur les termes du bilan hydrique

Même mode de travail qu'en 2.2.3., mais avec la boucle sur PRUSS ou KRUSS.

On notera l'intérêt de cette simulation, en particulier sur la valeur du seuil KRUSS, pour approfondir le vaste problème du "rôle du travail du sol sur l'économie de l'eau". Ainsi, quelques simulations bien choisies et complètes valent peut-être mieux que des années d'expérimentation coûteuses et incertaines.

2.2.5. Influence d'un retard "technique" du semis (par rapport à l'événement "PSEM") sur le bilan hydrique

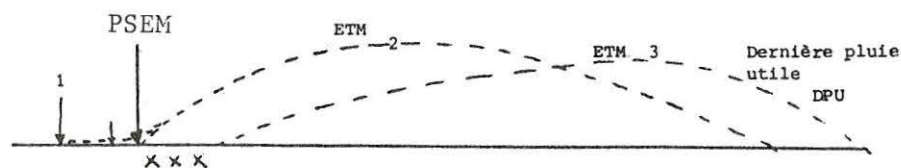
En agronomie et étude des systèmes, cette simulation est fondamentale puisqu'elle intègre la complexe réalité de l'exploitation agricole, à savoir la capacité technique d'optimiser ou pas le bilan hydrique, donc la valorisation par la plante de la ressource pluviométrique (tabl. 19).

2.2.6. Estimation de la dose d'irrigation de complément

Dans cette hypothèse, l'utilisateur fixe le démarrage des cultures à une date fixée DEBUT = constante. En général, cette période correspond à l'époque où la plupart des agriculteurs "pluviaux stricts" sont prêts à semer... (éviter un DEBUT trop précoce, sinon effet d'oasis, attaques d'oiseaux, etc, votre culture ayant le grand défaut d'être la première à se présenter !)

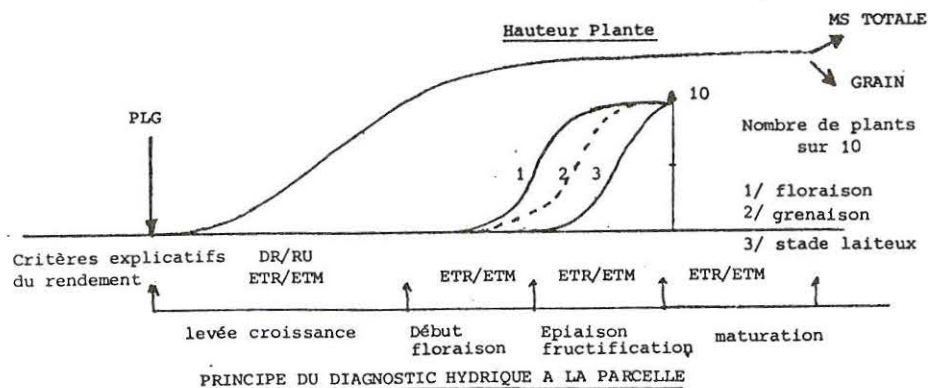
TABLEAU 19

LA PLUIE DE LEVEE GENERALE DE LA VEGETATION ET
LE CALAGE VARIETAL SELON LE SYSTEME DE CULTURE



- Situation 1 . Semis en sec et attente de la pluie d'humectation pour la levée générale.
- Situation 2 . levée en masse des semis en sec -
 . semis dans les heures, ou jour suivant la pluie -
 décalage inférieur à 5 jours.
- Situation 3 . Semis 15 jours après la pluie d'humectation profonde PLG
 . risque compétition enherbement
 . perte de la ressource en eau (15 jours d'évaporation sol nu)
 . risque déficit en fin de cycle.

RELATION ENTRE LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE ETR/ETM CALCULES
POUR 4 PERIODES DE VIE ET LES COMPOSANTES DU RENDEMENT



Ayant fixé DEBUT, la simulation se fait pour une valeur donnée de l'irrigation de semis IDSEM et une série de "doses de complément". Le modèle BIP considère en effet la valeur de "dose" introduite et indiquée par l'utilisateur comme une consigne répétitive. Seule la fréquence, en fonction des pluies, variera d'une année à l'autre.

Remarque : les tests de recherche du seuil PSEM (2.2.1.) sont parfois réalisés par défaut. Le modèle prenant en effet en compte une fraction de la réserve en eau du sol, au cas où des pluies interviennent au cours des jours précédant l'arrivée de la pluie identifiée comme pluie de semis.

2.3. Comparaison de plusieurs situations agronomiques

2.3.1. Comparaison de 3 durées de cycle différentes

L'utilisateur prépare 3 fichiers ETP ETM caractéristiques de chaque durée de cycle :

ETP ETM 1	cycle de durée 1	plante identique
ETP ETM 2	"	" 2 "
ETP ETM 3	"	" 3 "

La simulation est alors réalisée pour une combinaison constante des autres paramètres.

2.3.2. Effet d'un retard du semis par rapport à la date optimale de démarrage des cultures sur la satisfaction des besoins en eau

L'utilisateur s'intéresse au problème du retard du semis, lequel peut être dû à des facteurs impondérables (pas de semence, pas de paire de boeufs, pas de charrue, semoir, etc) ou à une décision volontaire due à des contraintes d'organisation du travail.

Dans ces situations, la simulation permet à travers le paramètre DECALAGE (Tab. 18) de tester les différents délais de retard par rapport à l'événement PSEM (rappel tab. 19).

2.3.3. Possibilité de réaliser une culture derobée.

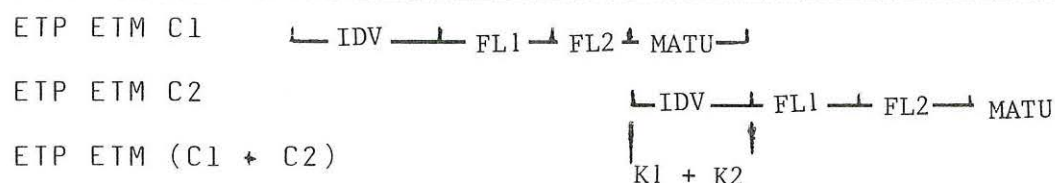
Le système de culture comprend une culture principale prioritaire, semée sur l'événement PSEM/C1.

L'agriculteur prévoit de lancer une culture derobée C2 à partir à partir de la phase maturation de la culture C1.

Pour simuler cette situation, il convient de procéder comme suit :

Soit ETP ETM 1 et ETP ETM 2 les fichiers Besoins en eau de chaque culture C1 et C2.

Le fichier du système de culture C1 + C2 s'établit en associant les 2 séries et en ajoutant, à compter du début de la phase 4 de la culture C1, les coefficients K'1 aux coefficients K'2, soit schématiquement :



Les valeurs ETP étant conservées constantes, la modification ne porte donc que sur la série des coefficients culturaux.

2.3.4. Système de culture de saison des pluies et de saison sèche

Dans ce cas, la première culture C1 est toujours la culture pluviale avec son implantation fixée à la date DEBUT (en

irrigation de complément, on maîtrise le risque climatique, par suite le test sur PSEM n'est pas utile).

La période interculture est fixée à une durée cohérente, compatible avec les contraintes techniques. On prendra en général 1 mois, soit 6 périodes de 5 jours (modèle BIP à pas 5 jours) ou 3 décades.

Le fichier des coefficients K' de la seconde culture est alors introduit après la zone réservée à l'intersaison, soit :

ETP ETM ($C1 + C2$)

ligne 1	NOM	PLANTE	DECOUPAGE
2	ETP	1er semestre	
3	ETP	2ème "	
4			CULTURE 1
5		intersaison.	
6		CULTURE 2	
7			

Remarque : pour ce type de simulation, on introduira les valeurs d'irrigation IDOSE IDOSEM qui seraient prises en compte aussi bien pour l'irrigation de complément de saison des pluies (C1) que pour la culture de saison sèche (C2).

3. EVALUATION PAR SIMULATIONS SUCCESSIVES DE LA RESERVE MOYENNE UTILISABLE PAR LA CULTURE, A L'ECHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

3.1. Principe

Dans la plupart des cas, hors station, on dispose de peu d'informations sur le comportement hydrique du sol. Par contre, on peut collecter des données de rendement et disposer

de relevés pluviométriques. L'agronome, le développeur sont souvent intéressés par une étude de la relation Production - Pluviométrie. Si la méthode du bilan hydrique est reconnue comme efficace (voir chapitre III, Résultats), il faut pour l'exploiter avoir des estimations de la réserve utile.

3.2. Méthode

La simulation, sur la série chronologique des années, pour lesquelles on dispose de relevés de rendement, est réalisée avec un nombre N de simulations de situations pour les valeurs de RU (1 à 4).

En agriculture tropicale, on prendra la gamme RU variant de 30 mm à 180 mm (glacis, sol gravillonnaire à enracinement peu profond RU=30
ou sol brun homogène profond RU=180mm .

L'utilisateur considèrera, pour tenir compte de la variabilité, des lots de semis, soit :

- une simulation année par année, avec la date exacte de semis (pentade n° DEBUT) et 4 boucles de calcul sur RU,
- 3 simulations avec tests sur la pluie de semis avec :
 - . un décalage = 0
 - . un décalage de 10 jours
 - . un décalage de 20 jours.

Chaque simulation (semis) étant faite pour les N valeurs de RU (on prend ainsi en compte la variabilité réelle des actions réalisées par les paysans).

3.3. Interprétation

L'utilisateur établit alors un tableau de correspondance en vue de procéder à une analyse de régression simple :

Année	RDT	ISBE (cycle)			
1	R1	ISBE1 (RU1)	ISBE1 (RU2)	...	ISBE1 (RU _N)
K	RK	ISBEK (RU1)		ISBEK (RU _N)

Les coefficients de corrélation et explication R et R² sont alors estimés. Un tableau de diagnostic est alors établi :

Tableau 20 : Diagnostic RU - Valeur du R²

Situations	Semis S1	S2	S3	ou 5 (réelle)
RU 1	0.30	0.27	0.20	0.40
RU 2	0.70	0.71	0.72	0.60
RU 3	0.80	0.85	0.86	
	0.60	0.65	0.67	
RU _N	0.30	0.35	0.40	

Les valeurs maximales du coefficient R sont alors facilement identifiées. L'intervalle de variation de RU pour lequel on obtient les valeurs les plus fortes des R² correspond donc à une représentation explicative des valeurs réelles de la RU à l'échelle des parcelles cultivées. La RU peut en effet être interprétée, compte tenu des résultats bioclimatologiques déjà bien connus, comme le paramètre déterminant la relation Production - Pluviométrie, si on considère les facteurs agronomiques comme constants ou peu variables par rapport à la fluctuation climatique.

Cette méthode, à l'échelle du développement, s'avère opérationnelle. En termes de validation scientifique, il conviendra toutefois, là où cela est possible, de la confirmer en travaillant sur des essais en station et des résultats de bilan hydrique in situ.

Compte tenu des problèmes pratiques urgents qui se posent à l'agriculture tropicale pluviale confrontée à la sécheresse, on admettra que cette approche est déjà susceptible de contribuer à proposer des solutions efficaces à court terme :

- sélection des terrains à RU élevé,
- prise de conscience de l'intérêt du travail du sol pour augmenter la RU
- sélection de variétés à puissance d'enracinement élevée (ex : variétés de riz IRAT, etc)
- recours raisonné à une irrigation de complément bien optimisée (économie et valorisation de l'eau).

4. LES RESULTATS DE LA MODELISATION

Le modèle propose 2 types de fichiers de résultats, qui peuvent être visualisés sur console (80 caractères) ou écrits sur imprimante.

4.1. Le fichier de résultats élémentaires "SORTIE"

Il donne, saison par saison, les résultats élémentaires du bilan hydrique, période par période (tableau 21). Il existe plusieurs possibilités de sortie selon ce que désire l'utilisateur :

1) Sortie complète du bilan hydrique :

- . l'utilisateur demande 72 lignes (pas : 5 jours) ou 36 lignes (pas : 10 jours)

2) Sortie des résultats saisonniers :

- . l'utilisateur demande 0 ligne ; dans ce cas, n'apparaissent que les valeurs récapitulatives.

3) Sortie des valeurs de l'évaporation du sol nu, avant ou après culture :

- 3.1. Si on est en conditions d'irrigation, avec une valeur DEBUT fixée, ou si l'on connaît la période exacte du semis, l'utilisateur joue sur 2 paramètres :
- . DEBUT est indiqué avec une valeur DEBUT-DECALAGE
 - . le DECALAGE est indiqué et le test PSEM est mis à la valeur 0 .

Exemple :

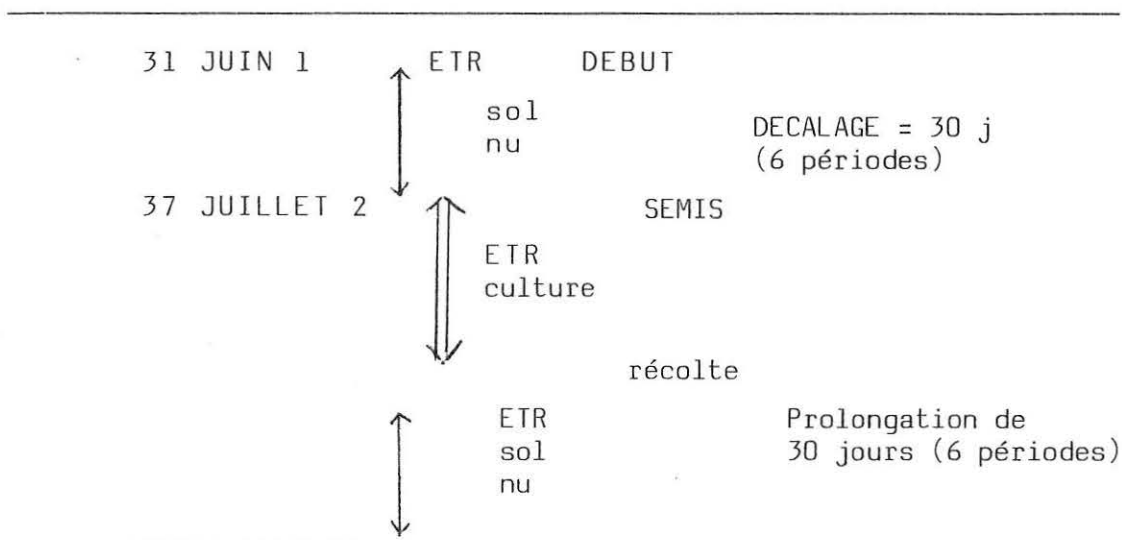
Pas : 5 jours

Période semis : 37 (1-5 juillet)

Pour avoir une visualisation sur 30 jours de l'évaporation du sol avant et après le semis (37), il faut indiquer :

- . $DEBUT = 37 - 6 = 31$
- . $PSEM = 0$
- . $DECALAGE = 30$ jours
- . $LIGNE : (durée \text{ du cycle en jours}) / pas + 2 \text{ (6)}$

Auquel cas le modèle donnera :



4.2. Le fichier de synthèse "SATISETR"

Il s'agit d'un fichier "référentiel" donnant les valeurs des indices de satisfaction des besoins en eau ISBE pour chacune des phases végétatives. La lame d'eau en excédent au drainage est indiquée pour les phases de levée-croissance IDV et initiation florale cumulée Fl.1).

Les valeurs du ruissellement ou de l'irrigation sont indiquées si nécessaire (tableau 22).

Les valeurs moyennes, calculées sur la série chronologique utilisée sont utiles pour les approches comparatives, les tests de sensibilité, les zonages. Ces valeurs peuvent en effet faire l'objet d'un KRIGEAGE.

Tableau 22

RESULTAT DU BILAN HYDRIQUE STATION :DANDEY AICA 3H

PLUVIOMETRIE LEVEE GENERALE : 30.0 MM

CULTURE :ARACHIDE 105 RU : 90 MM PAS 5 JOURS PERIODE DEBUT :36

=====									
PHASE	levee	debut	pleine	remplissag					
PHYSIO	croiss	lepi,fleur	epi,flor	maturati					
Jas	30	55	90	105	CRITERES POUR LE CYCLE				
ANNEE	ETR/ETM	ETR/ETM	ETR/ETM	ETR/ETM	SOMETR/SOMETPI	SDR	RUS	ou	
	idv	fl1	fl2	matu		idvfl1IRRI			
1973	.76	.92	.80	.21	.65	29.1	0.		
1977	.65	.68	.88	.43	.63	0.1	0.		
1979	.97	.57	.84	.53	.70	0.1	0.		
MOY	.77	.72	.84	.37	.66	10.	0.		

Chaque situation simulée (boucle sur N) est représentée par un tableau de synthèse.

Remarque : en phase de traitement, l'utilisateur devra impérativement sauvegarder les fichiers "SORTIE" et "SATISETR" issus d'une simulation, avant de relancer la commande BIP.

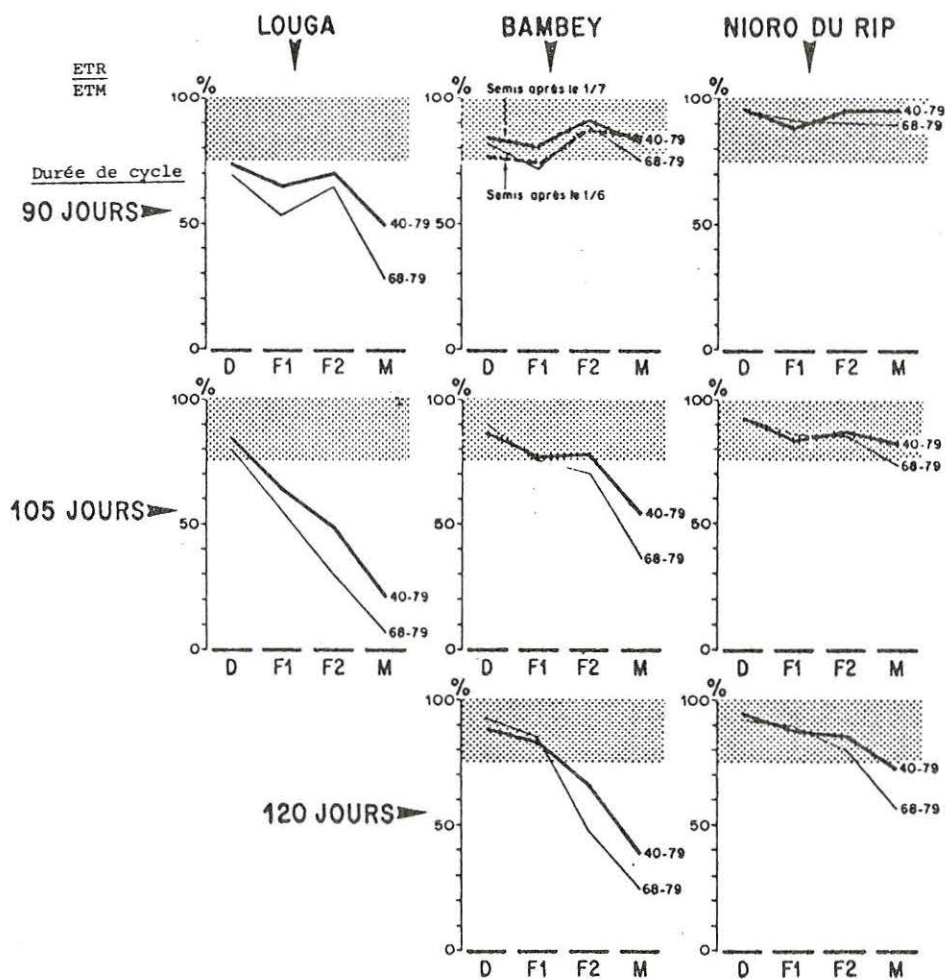
PARTIE III

EXEMPLES D'UTILISATION DU MODELE BIP

APPLICATIONS AGRONOMIQUES

INFLUENCE DES CONDITIONS PLUVIOMETRIQUES SUR LA
SATISFACTION DES BESOINS EN EAU DE LA CULTURE DE L'ARACHIDE

Sol sableux : type DIOR RU : 50 mm enracinement 1 mètre.



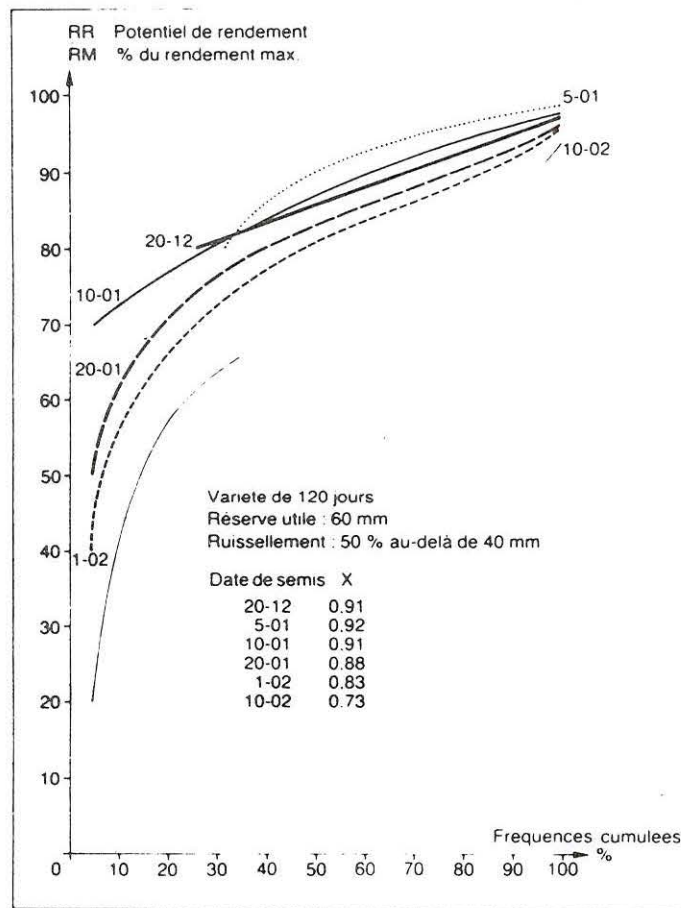


Fig. 3 Calage du soja
Evaluation de l'influence de l'alimentation hydrique
suivant les dates de semis

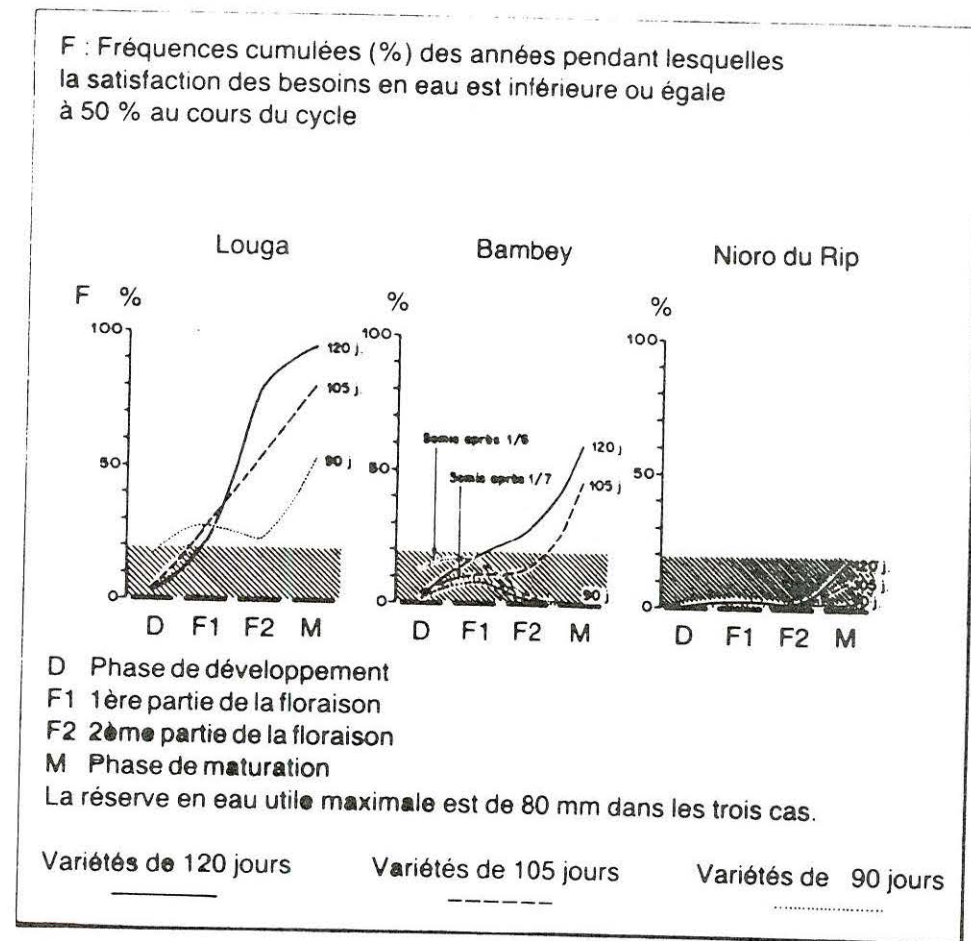
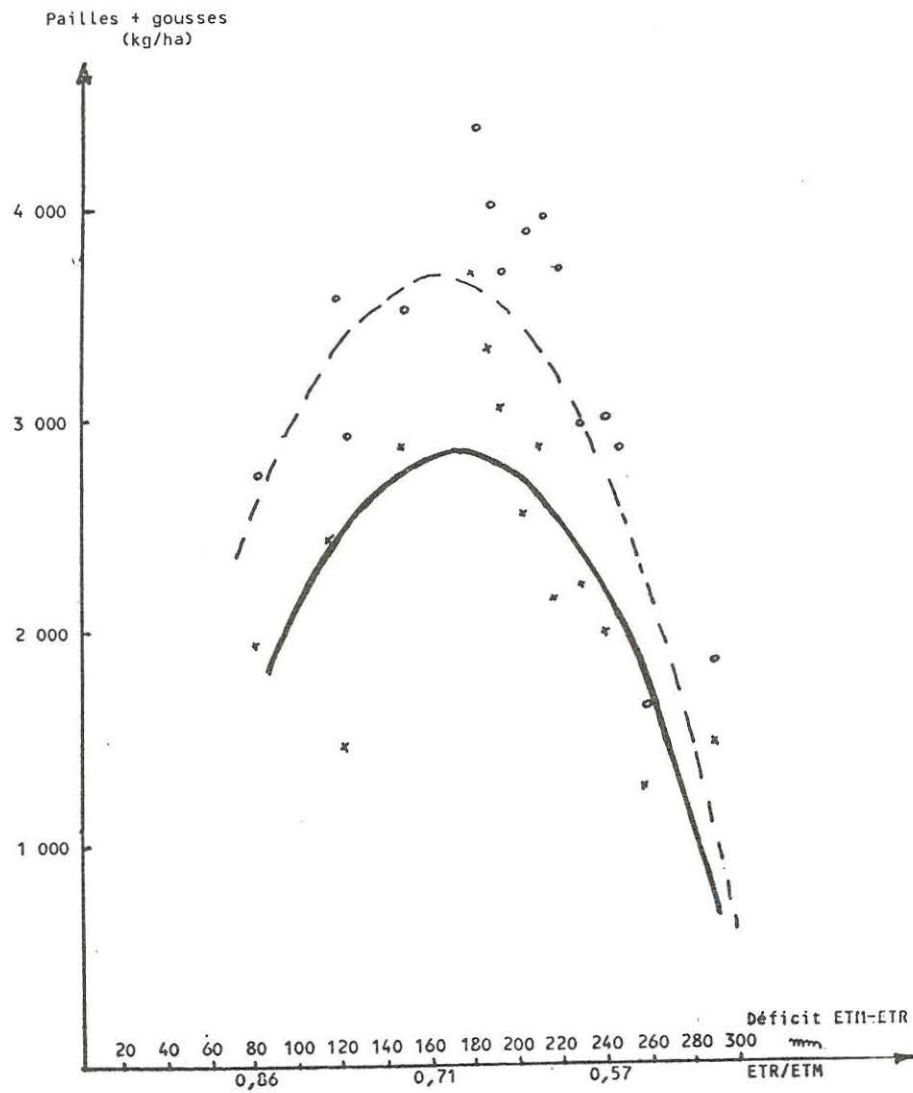


Fig. 1 Evaluation des risques de sécheresse grave* pour l'arachide
au Sénégal (période 1940-1979)

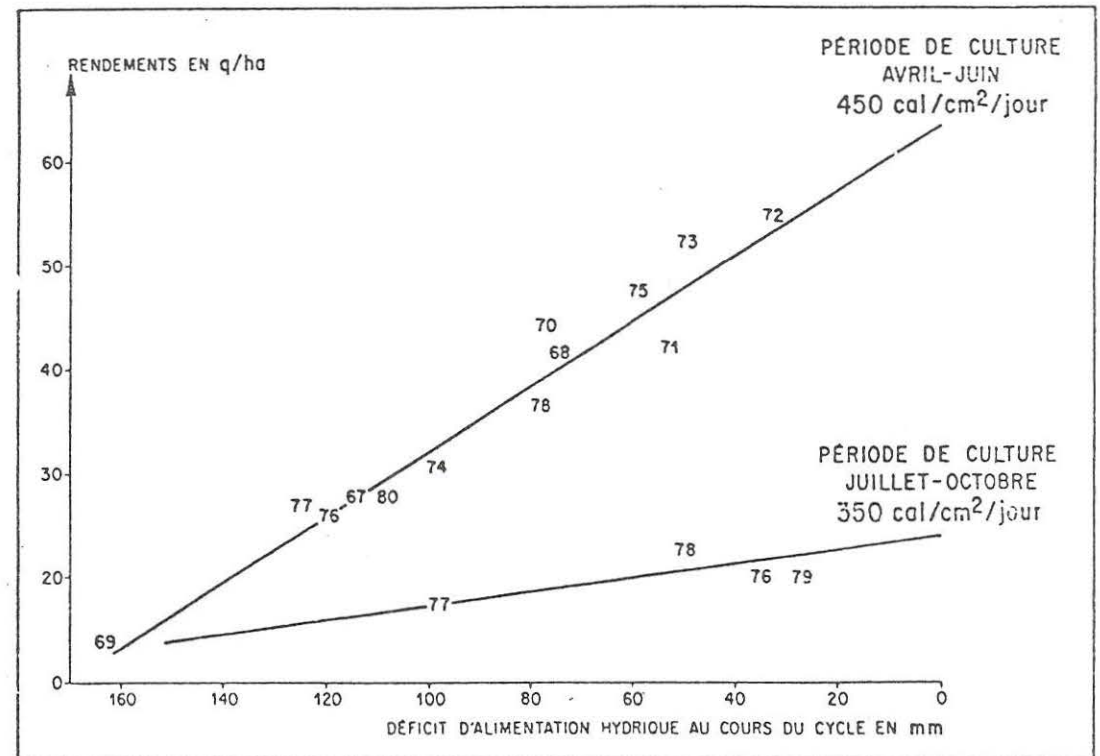
*Sécheresse « grave » : $\frac{\text{consommation réelle ou ETR}}{\text{besoins en eau ou ETM}} < 50 \%$

MATIERE SECHE TOTALE RECOLTEE EN FONCTION DU DEFICIT HYDRIQUE
 ESSAI TRAVAIL DU SOL DABBEY ARACHIDE/ARACHIDI



— x Témoin $Y = 0,14 X^2 + 48 X - 1\,262$ $r = 0,742$ S
 - - o Labour $Y = 0,16 X^2 + 51,7 X - 504$ $r = 0,831$ THS

Résultats ISRA (JF POULAIN - R. NICOU - JL CHOPART)



: RENDEMENT DU MAIS EN FONCTION DU DEFICIT HYDRIQUE POUR DEUX SAISONS DE CULTURE, A BOUAKE EN COTE D'IVOIRE

A N N E X E S

- I. Coefficients cultureux $K'(\text{stade}) = \frac{ETM}{EVA}$
obtenus par les techniques neutroniques (11)
- II. Base de données Réserve Utile de référence (RUR)
en fonction de la toposéquence (12)
- III. Documentation

M I L	DECADES ET NUMERO D'ORDRE												Total cycle	Rendements Kilos/ha		Pluviom. en mm.	Dose irri- gation en mm.	Consommation totale en mm.	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain	Paille				
MIL SANIO 120 jours Bambey (2 ans) 1976 et 1977	10,21	0,30	0,45	0,68	0,90	1,05	1,16	1,19	1,18	1,06	0,90	0,75	0,76	1/ 2 035	1/ 13 950	1/ 399	1/ 215	1/ 562	
														2/ 1 623	2/ 14 425	2/ 374	2/ 283	2/ 628	
MIL SOUNA 90 jours Bambey (2 ans) 1973 et 1974	0,31	0,42	0,68	1,02	1,10	1,08	0,92	0,84	0,78	-	-	-	0,73	1/ 2 690	1/ 6 680	1/ 400	1/ 68	1/ 417	
														12/ 2 948	12/ 5 760	2/ 492	2/ 73	2/ 416	
MIL NAIN GAM 75 jours Bambey (2 ans) 1974 et 1975	0,45	0,55	0,75	0,95	0,95	0,80	0,70	0,68	-	-	-	-	0,65	1/ 2 151	1/ 5 940	1/ 447	1/ 51	1/ 320	
								(5j)						2/ 1 721	2/ 5 650	2/ 510	2/ 0	2/ 327	
P 3 KOLO 104 jours Tillabéry-Niger (1 an)	0,40	0,48	0,52	0,68	0,75	0,82	0,82	0,74	0,65	0,54	0,46		0,62	2 230	9 000	210	400	630	
S O R G H O																			
V - 137 - 62 133 jours Tillabéry-Niger 1972	0,52	0,54	0,60	0,62	0,70	0,75	0,80	0,84	0,84	0,84	0,84	0,80	0,70	2 890	18 000	273	630	845	Fréquence d'irrigat. insuffi- sante.
V - 137 - 62 110 jours Maradi - Niger (5 ans)	0,40	0,60	0,80	1,10	1,20	1,20	1,20	1,20	1,10	0,90	0,70	-	0,95	potentiel de 4 000	?	582 sur 5 ans	60 à 250	500	Référence Bac la enterre type ORSTOM
V - 126 150 jours Mogtedo - Haute-Volta 1968	0,60	0,70	0,76	0,88	1,04	1,12	1,24	1,24	1,00	0,92	0,92	0,92	0,91	1 525	?	701 Juin à Octobre	?	682	
V - CE 67 90 jours Bambey - 1975	0,37	0,44	0,50	0,88	0,96	0,90	0,82	0,78	0,68	-	-	-	0,70	2 000 à 2 500 sol sableux + fumier	7 000	542	0	390	Grande hé- térogénéité sol peu favorable
V - ? FAO - OMVS Richard Toll 1972	0,30	0,55	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	"	"	"	"	"	détruit (oiseaux)	-	-	-	-	culture détruite par les oiseaux

- Tableau n° 4 - Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev Bac normalisé classe A}}$ obtenus en Afrique de l'Ouest francophone, sur mil et sorgho.

ARACHIDE	DECADES ET NUMERO D'ORDRE												Total cycle.	Rendements K/ha		Pluviom. en mm.	Dose d'ir- rigation en mm.	Consommation totale en mm.	Observa- tions.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		grain ou gousse	fânes				
V - 55437 hâtive - 109 jours Tillabéry / Niger 1972	0,36	0,38	0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,73	0,73	0,70	0,56	-	0,56	2 970 (gousse)	-	272	365	580	cycle al- longé (nor- malement 90 jours)
V - 55437 90 jours Bambey/Sénégal 1974	0,41	0,57	0,67	0,90	0,83	0,78	0,77	0,65	0,65	-	-	-	0,69	2 945 (gousse)	3 300	492	72	405	
V - 57422 105 jours Bambey/Sénégal 1973	0,23	0,41	0,65	0,93	1,06	1,04	0,93	0,93	0,92	0,90	0,90 (5 j.)	-	0,79	3 660 (gousse)	4 988	400	182	548	
V - 28206 120 jours Bambey/Sénégal 1976/77	0,26	0,38	0,48	0,64	0,83	0,97	1,07	1,00	0,93	0,78	0,74	0,65	0,73	3 699 (gousse)	3 902	374	259	557	
NIÉBÉ																			
Niébé V- 58-57 126 jours Guédi-OMVS 1972-73	0,30	0,55	0,75	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75	0,54	0,52	0,50	0,62	320 a 1 392 (grain)	/	67 a 124	/	746	
Niébé - B 21 75 jours Bambey/Sénégal 1975	0,38	0,60	0,95	1,08	1,00	0,80	0,75	0,72 (5 j.)	-	-	-	-	0,76	1 320 (grain)	3 400	535	20	335	
Niébé MOUGNE 75 jours Bambey - 1982	0,42	0,60	0,74	0,97	1,06	1,08	0,80	0,57	-	-	-	-	0,76	1 715 (grain)	3 451	452	0	322	Irrigation inutile.
SOJA																			
44 A 73 110 jours Djibelor 1978	0,66	1,00	1,28	1,40	1,44	1,20	0,75	0,52	0,45	0,42	0,40	-	0,80	5 050 (gousse)	2 100	1 490	<50	314	Drainage difficile.

- Tableau n°4 (3) suite - Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev Bac normalisé classe A}}$ obtenus en Afrique de l'Ouest francophone sur arachide, niébé et soja.

MAÏS	DECADES ET NUMERO D'ORDRE												Total du cycle	Rendements en kg/ha		Pluvio- métrie en mm.	Dose d'irriga- tion en mm.	Consomma- tion totale en mm.	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain	Paille				
MAÏS V. MASSA Yamba V. KOLO P3 100 jours. Mogtado / Haute-Volta, 1968 - (billons)	0,76	0,84	0,92	1,10	1,20	1,26	1,26	1,20	1,06	0,68	-	-	0,92	4 330	?	701 (juin à octobre) 128 en mai	?	?	?
MAÏS V. BDS Bambey - 110 jours (à plat) - 1975 Sol Dior / Sénégal Moyenne 2 essais	0,35	0,45	0,50	0,58	0,74	0,79	0,93	0,93	0,91	0,86	0,66	-	0,70	1 250 et 1 546	2 200 et 2 300	544	81	624	Sol peu favorable;
MAÏS V. MAKKA Guédé/Sénégal FAO-OMVS 1972 - (billons)	0,30	0,40	0,64	0,85	0,90	0,90	0,85	0,80	0,82	0,45	-	-	0,67	1 280	?	124 (très aride)	?	635	
RIZ PLUVIAL																			
Diverses variétés Djibelo-Casamance 1973-1976	0,60	0,80	1,02	1,10	1,20	1,20	1,18	1,12	0,90	0,80	0,76	-	0,97	2 660 à 4 795	3 470 à 4 500	1 170 à 4 500	< 100	340 à 440	V. 6383 V. IKP V. 3026 V. 144 B9
Riz de casier semis direct - TN n°1 Guédé 1972/1973 FAO-OMVS	0,50	0,80	1,10	1,16	1,20	1,20	1,20	1,20	1,18	1,06	0,72	0,30	0,97	2 750 à 4 320	-	1 972-94 1 973-124	?	1 306 913	
SE 349 D 122 jours * Bouaké/Côte d'Ivoire 1975	10,90	10,92	10,96	10,98	11,00	11,02	11,07	11,37	11,43	11,43	11,37	11,03	1,12	potentiel 6 000	?	?	9 mm/j sauf pluie	440	
MOROBREKAN 145 jours Bouaké/Côte d'Ivoire 1975	0,80	0,86	0,93	0,97	1,02	1,08	1,17	1,15	1,34	1,40	1,34	1,28 à 11,22	1,14	potentiel 4 500	?	?	9 mm/j sauf pluie	542	

- Tableau n° 4 (2) suite - Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev Bac normalisé classe A}}$ obtenus en Afrique de l'Ouest francophone, sur maïs et riz pluvial.

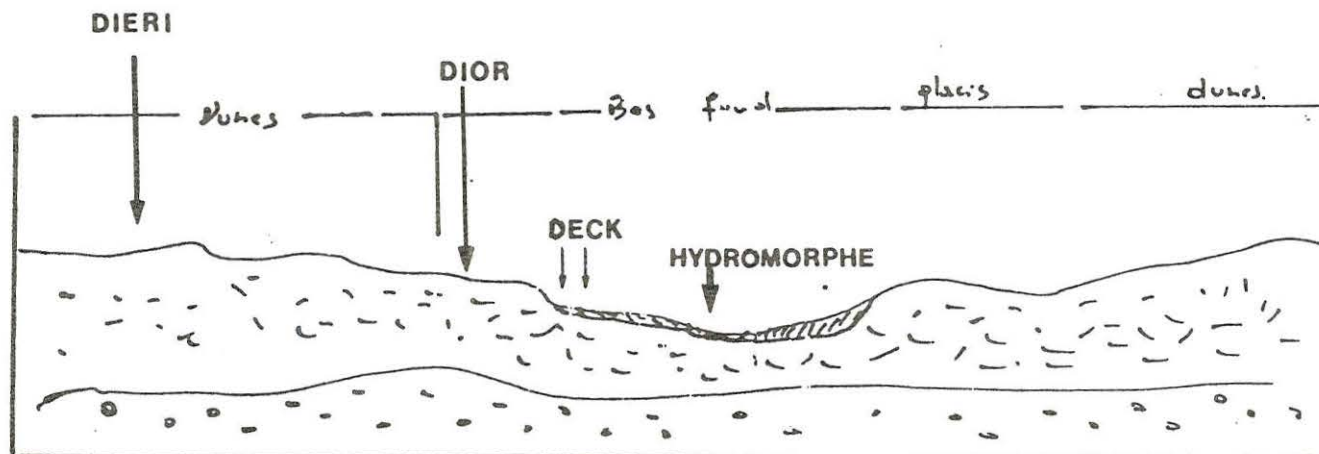
* Bouaké est mentionné bien que n'appartenant pas aux zones climatiques soudanienne et sahélienne.

COTONNIER	DECAIES ET NUMERO D'ORDRE												Cycle total	rendements Kg/ha		Pluvio. en mm.	Dose irrigation en mm.	Consommation totale en mm.	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain	Paille				
V. ALLEN 131 jours Tillabéry /Niger Site 1 - 1972	0,24	0,38	0,62	0,78	0,88	0,94	1,00	1,00	1,00	0,96	0,88	de 10,62 à 0,44	0,71	2 130	-	222	835	925	vigueur médiocre sol peu profond
IDEM Niger Site 2 - 1972	0,54	0,58	0,66	0,76	0,88	0,98	1,07	1,07	arrêt des irrigations				-	1 530	-	222	470	785 (réserves sol)	sol plus profond bonne vigueur ETM/80 j.
ALLEN 333 125 jours OMVS - Guédié Sénégal 1972/3	0,24	0,30	0,36	0,60	0,76	0,81	0,82	0,84	0,82	0,81	0,74	0,40	0,63	1 040 à 1 430	-	1972 - 80 1973 - 124	-	1972-725 1973-706	
HL1 et A. 333 130 jours Maradi/Niger 1966-70	0,44	0,52	0,62	0,74	0,84	0,96	1,01	1,03	1,03	1,01	0,96	0,93 à 0,87	0,84	entre 2 000 et 4 000	-	582	-	645	Référence: bac enterré "ORSTOM"
BJA SM 67 135 jours Bambey/Sénégal 1976	0,42	0,48	0,58	0,70	0,82	0,92	1,02	1,10	1,15	1,20	1,20	1,13 à 0,46	0,85	2 781	-	399	-	738	
BJA 119 jours Mogtedo/Haute-Volta 1968	0,78	0,82	0,88	0,96*	1,20	1,20*	1,16	1,14	1,04	0,90	0,84	0,78	0,97	2 450	-	919	-	566	Interpolation dernière récolte à 146 jours.
JACHÈRE D'HERBE																			
100 jours Bambey/Sénégal 1980	0,58	0,72	0,80	0,87	0,93	0,95	0,95	0,93	0,84	0,75	-	-	0,83	-	4 500 m.s.	407	161	534	

- Tableau n°4 (4) Suite - Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev Bac normalisé classe A}}$, obtenus en Afrique de l'Ouest francophone sur cotonnier et jachère d'herbe.

TOPOSEQUENCE SAHELIENNE SUR DEPOT SABLEUX EOLIEN
PLUVIOMETRIE $0 < P < 600$ mm

TYPE SOL	CODE	TEXTURE	Lame d'eau en mm (sur 0-100 mm)			RUR ↓ RU (0-100 CM)
			Capacité rétention	Point flétrissement	pa	
Sableux dunaire	Diéri	sable	56 mm	10 mm	1.4	46 mm
Sableux grossier	Dior	sable + limon	105 mm	25 mm	1.5	80 mm
Argilo-sableux	Deck	argile+limon	162 mm	36 mm	1.6	126 mm
Hydromorphe	Hyd	argile	182 mm	94 mm	1.6	88 mm



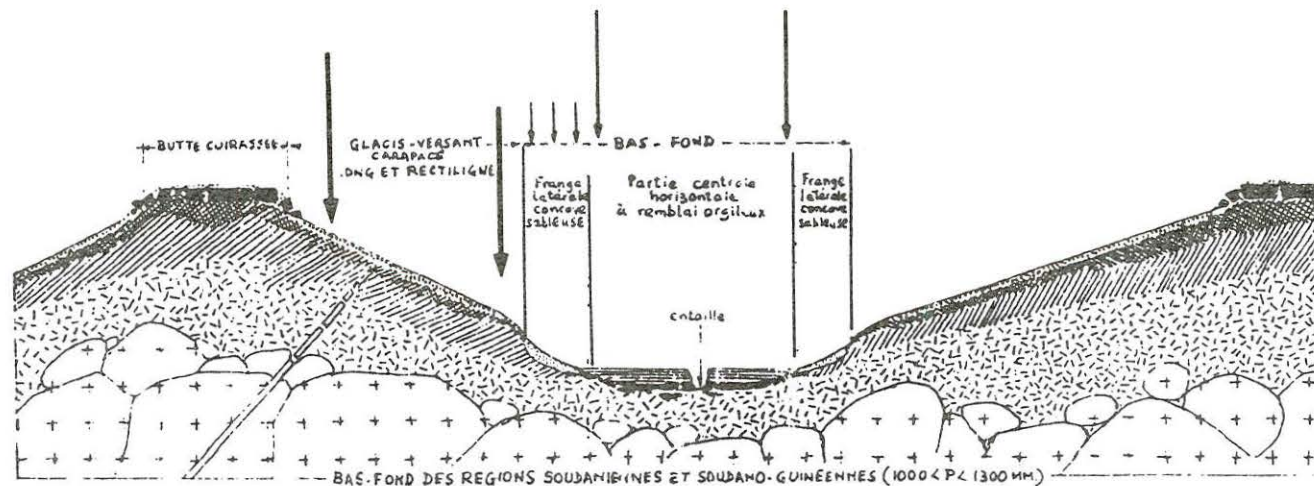
Toposéquence en zone sahélienne
sur dépôt éolien

TOPOSEQUENCE SOUDANIEENNE SUR SOCLE CRISTALLIN ET BUTTES

CUIRASSEES 1000 < P < 1300 mm

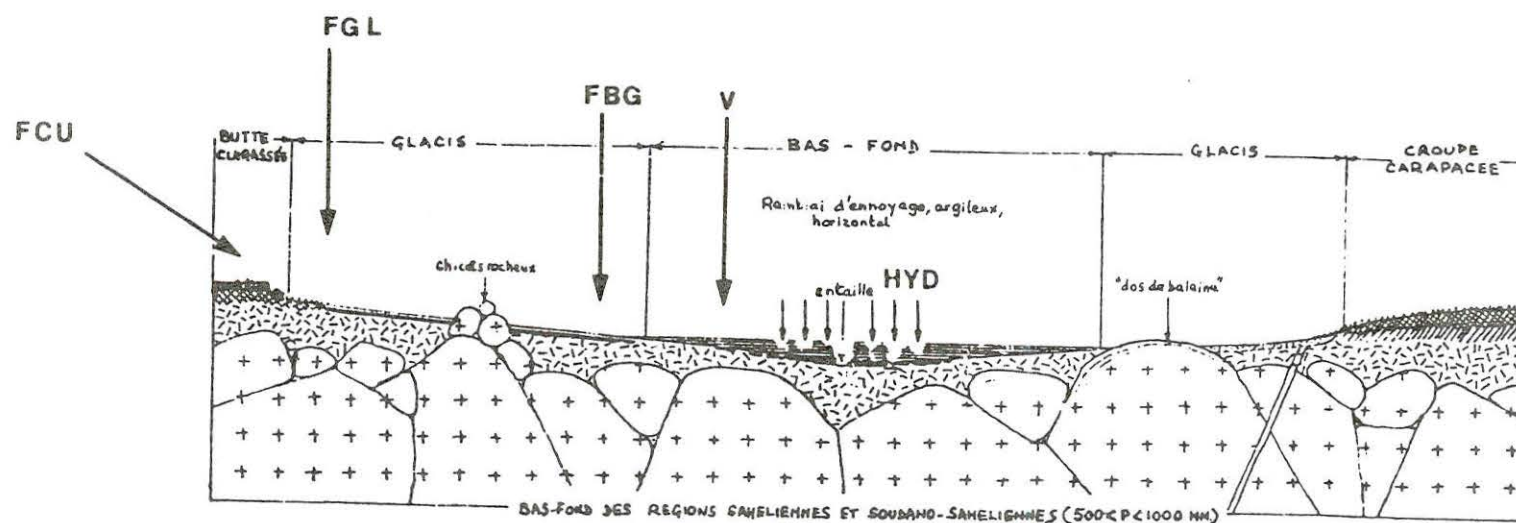
RUR ↓

CODE	TYPE SOL	TEXTURE	Capacité rétention	Point de flétrissement	densité apparente	Réserve utile 0-100 CM
FCU	Ferrugineux sur cuirasse	gravillonnaire	132	62	1,5	70
FEG	Ferrallitique gravillonnaire	argile + concretions	148	98	1,6	50
FEA	Ferrallitique ancien	argileux	271	181	1,5	90
FBG	Ferrugineux brun bas glacis	argileux	291	171	1,6	120
HYD	Hydromorphe vertique	argileux	347	200	1,8	147



TOPOSEQUENCE SOUDANO SAHELIEENNE SUR SOCIE CRISTALLIN
ET AFFLEUREMENT CUIRASSE 600 < P < 1000 mm

Code	Type	Texture	Capacité de rétention	Capacité au point Flétrissement	Densité apparente	^{RUR} Réserve utile mm sur (0-100 cm)
FCU	Ferrugineux sur cuirasse	gravillonnaire	132	62	1,5	70
FGL	Ferrugineux sur glacis	argilo-sableux	173	99	1,6	74
FBG	Ferrugineux brun bas glacis	argileux	291	171	1,5	120
V	Vertisol	argileux	349	200	1,7	149
H	Hydromorphe	argileux	182	94	1,5	87



D O C U M E N T A T I O N

- (1) ISRA Institut Sénégalais de la Recherche Agronomique.
Etudes hydropédologiques du CNRA Bambey.
Voir DANCETTE, IMBERNON, HAMON, FRETEAUD, etc

- (2) IDESSA Institut des Savanes. Bouaké, Côte d'Ivoire,
voir KALMS, POSNER, CHOPART, etc

- (3) IMG Institut Mécaniques des fluides de Grenoble,
voir VACHAUD, VAUCLIN, etc

- (4) ORSTOM Simulation ou ruissellement par simulateur,
opération de Kongoussi, Haute-Volta

- (5) AVV Autorité d'Aménagement des Vallées des Voltas,
Ouagadougou, Haute-Volta

- (6) FRANQUIN, FOREST : Des programmes pour l'évaluation et
l'analyse fréquentielle des termes du bilan
hydrique. AGRO TROP XXXII-1

- (7) AIEA Agence Internationale Utilisation des Isotopes
de Vienne. Finance des recherches thématiques
sur les relations eau-sol-plante au Sénégal
(ISRA) et en Côte d'Ivoire (IDESSA).

- (8) EAGLEMAN Jr : An experimentally derived model for actual
evapotranspiration. AGRIC. Meteorology 8(4-5) 1971

- (9) FOREST F. : Le bilan hydrique, facteur de production des
cultures pluviales. Doc interne IRAT DRD 1982

- (10) FOREST F. : Evolution de la pluviométrie en zone soudano-sahélienne au cours de la période 1940-1979 et conséquences sur le bilan hydrique des cultures pluviales au Sénégal. Agro Trop XXXVII-1
- (11) DANCETTE C. : Basoins hydriques des cultures pluviales et politique agricole de l'eau dans les zones Centre et Nord du Sénégal. ISRA - CNRA Bambey 1976
- (12) IRAT-CIEM : Valorisation agricole des ressources pluviométriques - Synthèse atelier IRAT-CIEM Ouagadougou Nov. 83.